



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE HASSIBA BEN-BOUALI DE CHLEF**

*Faculté de Technologie*  
*Département de mécanique*  
*Laboratoire de Mécanique et Energétique*

## **THESE**

En vue de l'obtention du

**DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES**

**Spécialité : Génie Mécanique**

## **Thème**

**Production du froid solaire par adsorption et analyse de la performance par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels**

Présentée et soutenue le. 03 / 07 / 2017, par :

**M. Fatih BOUZEFFOUR**

Devant le jury:

<b>LOUKARFI Larbi</b>	<b>Président du jury</b>	<b>Professeur</b>	<b>UHB Chlef</b>
<b>MERIEB BENZIANE Madjid</b>	<b>Examineur</b>	<b>MCA</b>	<b>UHB Chlef</b>
<b>BOUKLI HACENE Fouad</b>	<b>Examineur</b>	<b>MCA</b>	<b>EPS Tlemcen</b>
<b>KHELLAF Abdallah</b>	<b>Examineur</b>	<b>Directeur de recherche</b>	<b>CDER</b>
<b>MAZOUZI Ridha</b>	<b>Examineur</b>	<b>MCA</b>	<b>UDB Khemis - Miliana</b>
<b>TAHAR ABBES Miloud</b>	<b>Directeur de Thèse</b>	<b>Professeur</b>	<b>UHB Chlef</b>
<b>KHELIDJ Benyoucef</b>	<b>Invité</b>	<b>MCB</b>	<b>UDB Khemis - Miliana</b>

Année Universitaire 2016 / 2017

## Résumé

Le recours à des sources d'énergies, à la fois renouvelables et moins agressives pour l'environnement que les sources fossiles, s'avèrent incontournables pour permettre un développement énergétique durable pour les générations futures.

Afin d'apporter notre contribution, nous nous sommes intéressés dans notre étude à la production du froid solaire par adsorption. Dans ce travail, l'objectif visé est la production de froid à partir de chaleurs à bas niveaux thermiques telles que celles provenant du soleil. Dans cet optique, un générateur à adsorption a été mis au point à l'UNEDS pour réaliser expérimentalement un cycle thermodynamique basé sur le couple silicagel / eau. Le générateur a été testé dans les conditions météorologiques de Bou-Ismaïl, Algérie.

D'autre part nous avons développé une analyse de la performance d'un modèle neuronal du générateur solaire de notre système par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels. Nous rappelons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, à savoir les modèles statiques et dynamiques. Ensuite, nous avons simulé le comportement thermique de notre générateur solaire, qui représente l'élément le plus influant sur la performance du système de réfrigération solaire à adsorption, en utilisant l'environnement de MATLAB<sup>®</sup>.

**Mots-clés :** Energie solaire, réfrigération par adsorption, réseaux de neurones artificiels, silicagel-eau

## ملخص

ان استخدام مصادر الطاقة، سواء المتجددة وأقل عدوانية على البيئة من مصادر الطاقة الأحفورية، ضروري لتمكين تنمية الطاقة المستدامة للأجيال القادمة.

من أجل تقديم مساهمتنا في هذه المهمة ، ركزنا في دراستنا على إنتاج التبريد الشمسي باستعمال السيليكا جل / الماء عن طريق الامتزاز. في هذا العمل، الهدف هو إنتاج البرودة من مستويات درجات الحرارة المنخفضة مثل تلك التي من اشعاعات الشمس. وفي هذا السياق، تم تطوير وتركيز الدراسة في جزء منها على تحقيق واختبار النظام المركب المستخدم لإنتاج التبريد عن طريق ظاهرة الامتزاز. تم اختبار النظام تحت الشروط المناخية لمدينة بو اسماعيل، الجزائر.

ومن ناحية أخرى دراسة نظرية باستخدام نموذج الشبكة العصبية الاصطناعي تم تطبيقها على هذا النظام، وخاصة لوصف السلوك الحراري لمجمع الطاقة الشمسية باستعمال النتائج التجريبية المحصل عليه. ذلك قمنا بتطوير تحليل أداء النموذج العصبي للمولد للطاقة الشمسية من خلال تطبيق نهج الشبكات العصبية الاصطناعية. في هذا الجزء، نشير إلى تعريف وخصائص الشبكات العصبية، قبل وصف البنى العصبية والنماذج الأكثر استخداما. ثم محاكاة السلوك الحراري لمولد الطاقة الشمسية، الذي يعد من اهم العناصر الاساسية التي تؤثر على أداء نظام التبريد الشمسي، وذلك باستخدام بيئة (ماتلاب).

**الكلمات الرئيسية:** الطاقة الشمسية، التبريد الشمسي، الشبكات العصبية الاصطناعية، السيليكا جل / الماء

## **Abstract**

The use of energy sources, both renewable and less aggressive for the environment than fossil sources, are essential for sustainable energy development for future generations.

In order to present our contribution, we are interested in our study, to produce cold, by using solar and adsorption phenomena. In this work, the aim is to produce cold from low heat from the sun. An adsorption generator has been developed at the UDES to experimentally carry out thermodynamic cycle based on the Silica-gel / water couple. The generator was tested in the weather conditions of Bou-Ismaïl, Algeria.

On the other hand, we have developed an analysis of the neural model performance of the solar Adsorbed generator system by applying the artificial neural networks approach. We have defined properties of neural networks, before describing the most used neuronal architectures, namely static and dynamic models. Next, we have simulated the thermal behavior of our solar generator, which is the most important element effect on the performance of the solar adsorption refrigeration system, by using the MATLAB® environment

**Key words:** Solar energy, solar refrigeration, artificial neural networks, silicagel-water.

## Dédicaces

*Je dédie cette thèse  
A ma famille et à tous mes amis*

## Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a accordé la patience et la confiance pour que mes rêves ne restent pas vains.

Ce travail étant réalisé en partie à l'UNDES, je tiens à remercier les responsables, les techniciens et les chercheurs de cette unité.

J'adresse ma sincère et profonde reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur M. TAHAR ABBES, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, qui a accepté de diriger ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à mon Co-directeur de thèse le Docteur B. KHELIDJ, enseignant chercheur à l'Université Djilali Bounaama de Khemis–Miliana, pour son investissement et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de cette thèse.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont accepté de prendre de leur précieux temps pour porter un regard critique sur mon travail et suggérer d'autres pistes de réflexion.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur LOUKERFI Larbi, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour m'avoir fait l'immense honneur d'accepter de présider mon jury.

Je remercie Monsieur KHELLAF Abdallah, Directeur de recherches au CDER, pour m'avoir fait l'honneur de prendre part au jury de ma thèse.

Je remercie également le Docteur BOUKLI HACENE Fouad de l'EPS de Tlemcen, qui a bien voulu faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie le Docteur MAZOUZI Ridha de l'Université Djilali Bounaama de Khemis–Miliana, qui me fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements vont aussi au Docteur MERIEM BENZIANE Madjid de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, qui me fait l'honneur de prendre part au jury de ma thèse.

Enfin, je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'enrichissement de ma thèse.

---

# Sommaire

---

Dédicaces

Remerciements

Résumés

**Introduction Générale** **1**

## **Chapitre-I : Etude bibliographique**

<b>I.1.</b>	Introduction	<b>3</b>
<b>I.2.</b>	Etat de l'art	<b>3</b>

## **Chapitre-II : Principe de la réfrigération par adsorption par énergie solaire**

<b>II.1.</b>	Introduction	<b>9</b>
<b>II.2.</b>	Procèdes de transformation thermique de l'énergie solaire	<b>9</b>
<b>II.3.</b>	Principe du phénomène d'adsorption	<b>9</b>
	II.3. 1 Adsorption physique	<b>11</b>
	II.3. 2 Adsorption chimique	<b>12</b>
<b>II.4.</b>	Thermodynamiques de l'adsorption	<b>13</b>
	II .4. 1 Modèle de Langmuir	<b>15</b>
	II .4. 2 Modèle de Brunauer, Emmett et Teller (BET)	<b>15</b>
	II .4. 3 Théorie du potentiel et équation de Dubinin	<b>16</b>
	II .4. 4 Isostères d'adsorption	<b>17</b>
<b>II.5.</b>	Couples adsorbants /adsorbats	<b>17</b>
	II .5. 1 Obtention des adsorbants	<b>17</b>
	II .5. 2 Caractérisation des adsorbants	<b>19</b>
	II .5. 3 Adsorbants / adsorbats	<b>20</b>
	II .5. 4 Critères de sélection de l'adsorbant / adsorbat	<b>24</b>
<b>II.6.</b>	Cycle frigorifique à adsorption	<b>25</b>
	II .6. 1 Chauffage isostérique	<b>26</b>
	II .6. 2 Désorption et condensation	<b>27</b>
	II .6. 3 Refroidissement isostérique	<b>28</b>
	II .6. 4 Adsorption et évaporation	<b>28</b>

### **Chapitre -III : Description de l'installation frigorifique solaire**

<b>III.1.</b>	Introduction	<b>30</b>
<b>III.2.</b>	Eléments de la machine frigorifique solaire	<b>30</b>
III .2. 1	Capteur solaire	<b>30</b>
III .2. 2	Condenseur	<b>30</b>
III .2. 3	Evaporateur	<b>30</b>
<b>III.3.</b>	Choix et dimensionnement des éléments du prototype	<b>31</b>
III .3. 1	Chambre frigorifique	<b>32</b>
III .3. 2	Couple de fonctionnement	<b>36</b>
III .3. 3	Construction du condenseur et de l'évaporateur	<b>37</b>
III .3. 4	Générateur solaire	<b>39</b>
<b>III.4.</b>	Instrumentation de l'installation	<b>43</b>
III .4. 1	Mesure des radiances solaires	<b>44</b>
III .4. 2	Mesure de pression	<b>44</b>
III .4. 3	Mesure des températures	<b>44</b>
<b>III.5.</b>	Mise sous vide de l'installation	<b>45</b>

### **Chapitre - IV : Expérimentation de la machine frigorifique**

<b>IV.1.</b>	Méthodologie	<b>46</b>
<b>IV.2.</b>	Résultats expérimentaux	<b>48</b>
IV .2. 1	Les conditions climatiques et les radiations solaires	<b>49</b>
IV .2. 2	Evolution de la température dans le lit adsorbant	<b>51</b>
IV .2. 3	Changement de pression dans le lit d'adsorbant	<b>55</b>
IV .2. 4	Variation de la température dans le condenseur	<b>56</b>
IV .2. 5	Evolution de la température dans l'évaporateur	<b>69</b>
<b>IV.3.</b>	Performance de l'installation	<b>62</b>
<b>IV.4.</b>	Etude comparative	<b>63</b>

### **Chapitre -V : Modélisation du capteur par application des réseaux de neurones**

<b>V.1.</b>	Introduction	<b>65</b>
<b>V.2.</b>	Principe d'un réseau de neurone artificiel	<b>65</b>
<b>V.3.</b>	Modèles des réseaux de neurones	<b>67</b>

## Sommaire

---

---

V.3.1 Réseau de neurones statique	68
V.3.2 Réseau de neurones dynamique	69
<b>V.4. Algorithme d'apprentissage</b>	<b>69</b>
V.4.1 Apprentissage supervisé	70
V.4.2 Apprentissage non supervisé	71
V.4.3 Méthode de rétro-propagation	71
<b>V.5. Les réseaux de neurones dynamiques appliqués à notre cas</b>	<b>72</b>
V.5.1 L'équation de définition du modèle NARX	72
V.5.2 Identification des paramètres	74
<b>V.6. Méthode de résolution</b>	<b>75</b>
<b>V.7. Résultats numériques</b>	<b>77</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>83</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>86</b>
<b>Annexes</b>	<b>96</b>

## Liste des figures et des tableaux

<b>Liste des figures</b>		<b>Page</b>
<b>Figure II.1</b>	: Technologie du froid solaire [68], [69], [74]	<b>10</b>
<b>Figure II.2</b>	: Processus de l'adsorption [70]	<b>11</b>
<b>Figure II.3</b>	: Représentations graphiques des différents équilibres d'adsorption A : (T= cste), B : (T= cste), C : (m= cste)	<b>13</b>
<b>Figure II.4</b>	: Types des isothermes d'adsorption [72]	<b>14</b>
<b>Figure II.5</b>	: Structures de grains d'adsorbants hétérogènes et homogènes [77]	<b>18</b>
<b>Figure II.6</b>	: Distribution de la taille des pores (a) zéolite type 3A, (b) 4A, (c) 5A, (d) 10X, (e) 13X, (f) tamis carboné et (g) charbon actif [76]	<b>19</b>
<b>Figure II.7.a</b>	: Grains de charbon actif	<b>20</b>
<b>Figure II.7.b</b>	: Structure moléculaire de charbon active [74]	<b>21</b>
<b>Figure II.8.a</b>	: Granulés de Zéolithe [76]	<b>21</b>
<b>Figure II.8.b</b>	: Structure moléculaire de zéolithe [76]	<b>22</b>
<b>Figure II.9.a</b>	: Gel de silice	<b>22</b>
<b>Figure II.9.b</b>	: Structure moléculaire de gel de silice [74]	<b>23</b>
<b>Figure II.10</b>	: Cycle à adsorption dans un diagramme de Clausius-Clapeyron (Ln(P), -1/T).	<b>25</b>
<b>Figure II.11</b>	: Phase de chauffage isostérique	<b>26</b>
<b>Figure II.12</b>	: Phase de désorption et de condensation	<b>27</b>
<b>Figure II.13</b>	: Phase de refroidissement isostérique	<b>28</b>
<b>Figure II.14</b>	: Phase d'adsorption et d'évaporation	<b>29</b>
<hr/>		
<b>Figure III.1</b>	: Schématisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption	<b>31</b>
<b>Figure III.2</b>	: Photo de la chambre froide avec ses dimensions	<b>32</b>
<b>Figure III.3</b>	: Charges frigorifiques totales	<b>35</b>
<b>Figure III.4</b>	: Photo du condenseur à air	<b>37</b>
<b>Figure III.5</b>	: Photo de la chambre froide avec l'évaporateur	<b>38</b>
<b>Figure III.6</b>	: Schéma représentatif du capteur solaire à tubes	<b>40</b>
<b>Figure III.7</b>	: Structure détaillé de notre générateur solaire à adsorbant	<b>41</b>
<b>Figure III.8</b>	: Image du capteur solaire tubulaire ; (a): vue de face avant, (b): vue de coté	<b>42</b>
<b>Figure III.9</b>	: Photographie de diffuseur de gaz	<b>43</b>
<b>Figure III.10</b>	: Réfrigérateur solaire avec système d'acquisition de données	<b>44</b>

## Liste des figures et des tableaux

---

---

<b>Figure III.11</b>	: Vérification de l'étanchéité des éléments du système	<b>45</b>
<hr/>		
<b>Figure IV.1</b>	: Photo du réfrigérateur solaire à adsorption réalisé à l'UDES	<b>47</b>
<b>Figure IV.2</b>	: Positions des thermocouples sur le prototype	<b>48</b>
<b>Figure IV.3</b>	: Mesure des données solaires: l'irradiance globale et la température ambiante des jours de test	<b>51</b>
<b>Figure IV.4</b>	: Variation de la température avec le temps: du gel de silice ( $T_{gs}$ ), de la surface de tube ( $T_{st}$ ), de la surface de la vitre ( $T_v$ )	<b>54</b>
<b>Figure IV.5</b>	: Variation de la pression avec le temps dans le lit d'adsorbant pendant la période de chauffage durant les jours: 8, 15 et 22 Juillet 2015	<b>56</b>
<b>Figure IV.6</b>	: Variation de la température du condenseur ( $T_{co}$ ) et la température ambiante ( $T_a$ ) avec le temps (Juillet à 2015)	<b>59</b>
<b>Figure IV.7</b>	: Evolution de la température avec le temps dans l'évaporateur ( $T_{ev}$ ), la chambre froide ( $T_{ch}$ ), et l'extérieur ( $T_{ext}$ )	<b>61</b>
<hr/>		
<b>Figure V.1</b>	: Schématisation d'un réseau neuronal biologique	<b>66</b>
<b>Figure V.2</b>	: Modèle non linéaire d'un neurone	<b>67</b>
<b>Figure V.3</b>	: Structure d'un perceptron multicouche	<b>68</b>
<b>Figure V.4</b>	: Structure d'un réseau avec propagation vers l'avant	<b>69</b>
<b>Figure V.5</b>	: Structure de réseau dynamique	<b>69</b>
<b>Figure V.6</b>	: Apprentissage supervisé	<b>70</b>
<b>Figure V.7</b>	: Apprentissage non supervisé	<b>71</b>
<b>Figure V.8</b>	: Architecture de NARX	<b>74</b>
<b>Figure V.9</b>	: Modèle NARX pour prédire de la température de collecteur	<b>74</b>
<b>Figure V.10</b>	: Résultats expérimentales de système	<b>75</b>
<b>Figure V.11</b>	: Erreur quadratique moyenne pour la partie formation, validation et test	<b>79</b>
<b>Figure V.12</b>	: Coefficient de régression (R)	<b>80</b>
<b>Figure V.13</b>	: Autocorrélation de l'erreur	<b>81</b>
<b>Figure V.14</b>	: Résultats prédits par le modèle NARX	<b>82</b>
<b>Figure V.15</b>	: Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits	<b>82</b>

## Liste des figures et des tableaux

---

---

<b>Liste des tableaux</b>		<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	: Différents systèmes de réfrigération par adsorption	<b>8</b>
<b>Tableau II.1</b>	: Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique	<b>12</b>
<b>Tableau II.2</b>	: Principales propriétés physiques et chimiques des adsorbants [71]	<b>19</b>
<b>Tableau II.3</b>	: Propriétés physiques des réfrigérants [74]	<b>23</b>
<b>Tableau III.1</b>	: Dimensions de la chambre frigorifique	<b>33</b>
<b>Tableau III.2</b>	: Données de fonctionnement de la chambre froide	<b>33</b>
<b>Tableau III.3</b>	: Propriétés thermo physiques des surfaces absorbantes	<b>40</b>
<b>Tableau IV.1</b>	: Résultats expérimentaux obtenus avec notre système de réfrigération	<b>55</b>
<b>Tableau IV.2</b>	: COP expérimental du système de réfrigération à adsorption	<b>63</b>
<b>Tableau IV.3</b>	: Comparaison de COPs de systèmes de réfrigération par adsorption	<b>64</b>
<b>Tableau V.1</b>	: Performance du modèle NARX	<b>79</b>

## Nomenclature

Symbole	Désignation	unité
$P_s$	: Pression de saturation	(bar)
$R$	: Constante des gaz parfait	( $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$V$	: Volume	( $m^3$ )
$A, C$	: Constantes dépendant de l'adsorbat (réfrigérant)	(--)
$K$	: Coefficient dépendant du couple adsorbant – adsorbat	(--)
$T$	: Température de l'adsorbant	(K)
$N_a$	: Quantité adsorbée	(mol/kg)
$m$	: Masse de l'adsorbat	(kg)
$m_{\infty}$	: Valeur limité de la masse adsorbée à $T=cste.$	(kg)
$m_s$	: Masse de matériau sorbant	(kg)
$P$	: La pression d'équilibre d'adsorption,	(bar)
$T$	: La température	(°C)
$B(T)$	: Le paramètre de Langmuir	--
$q$	: Chaleur spécifique de l'adsorption	--
$e_i$	: Epaisseur de l'isolant thermique	(m)
$T_{am}$	: Température ambiante	(°C)
$T_v$	: Température de la surface transparente	(°C)
$T_{st}$	: Température de la surface du tube	(°C)
$T_{gs}$	: Température du gel de silice	(°C)
$T_{con}$	: Température du condenseur	(°C)
$T_{ev}$	: Température de l'évaporateur	(°C)
$T_{ch}$	: Température de la chambre froide	(°C)
$Me$	: Quantité d'eau adsorbée	(kg)
$I(t)$	: Incidente totale d'énergie par unité de surface	( $W / m^2$ )
$Ac$	: Surface totale du capteur solaire	( $m^2$ )
$L(T)$	: Chaleur latente de vaporisation de l'eau	( $kJ / kg$ )
$x_m$	: Signaux d'entrées	--
$w_{km}$	: Poids synaptiques	--
$v_k$	: Sortie due aux signaux d'entrées; k est le biais	--
$y_k$	: Signal de sortie du neurone	--
$\phi$	: Fonction d'activation	--
$b_k$	: Biais	--

## Nomenclature

---

---

$\varepsilon$	: Potentiel d'adsorption	--
$\beta$	: Coefficient d'affinité	--
$\lambda_i$	: Conductivité thermique de l'isolant	(W/m. K)
A, B, C, D	: Points du cycle sur le diagramme de Clapeyron	--
T_ext	: Température extérieure	(°C)
n	: Nombre de paires dans l'ensemble des échantillons	--
Sp	: Sortie prédictive par le réseau	--
Sr	: Sortie de données réelles.	--
NARX	: Réseau neuronal autorégressif non linéaire à entrées exogènes	--
ARX	: Réseaux neuronaux à entrées exogènes	--
T_cads	: Température du collecteur adsorbant	°C

---

# **Introduction générale**

---

A l'échelle mondiale, la production de froid dans l'habitat apparaît comme un enjeu énergétique majeur de ce nouveau siècle. L'essor économique des pays en voie de développement, soumis dans leur majorité à des climats chauds, va entraîner une demande croissante des besoins en froid. L'enjeu est également de réduire la consommation en énergie primaire et de limiter les pics de puissance en électricité.

Or actuellement, les solutions de production de froid reposent essentiellement sur des systèmes frigorifiques grands consommateurs en énergie électrique. Il convient alors de préparer des solutions acceptables socio économiquement et adaptées à la satisfaction de ces besoins futurs sans compromettre les engagements internationaux relatifs à la protection de l'environnement, en particulier pour la réduction des gaz à effet de serre par une diminution de la consommation en énergie fossile.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les pays ensoleillés est un moyen efficace pour pallier au manque d'énergie surtout dans les sites isolés sahariens. Parmi les procédés de transformations de l'énergie solaire, il y a lieu de citer la réfrigération solaire par adsorption.

De plus, l'amélioration du confort humain passe aussi par le développement de nouveaux équipements frigorifiques fonctionnant à l'énergie solaire. Cette forme d'énergie, dont les avantages sont multiples, notamment son origine inépuisable, son bénéfique impact en matière de pollution et sa disponibilité dans les pays sous-développés, constitue un atout de recherche et de réalisation qui touchera plusieurs domaines pouvant améliorer la qualité de la vie humaine.

En tenant compte de l'énorme quantité d'énergie solaire que reçoit notre pays, nous pensons qu'il est nécessaire et important d'exploiter cette ressource, renouvelable, notamment dans le domaine de la production du froid.

Afin d'apporter notre contribution au développement des énergies renouvelables, nous nous sommes intéressés dans cette étude, à la réalisation et l'expérimentation d'un système de réfrigération solaire utilisant le couple Gel de silice – Eau. D'autre part nous avons développé une analyse de la performance d'un modèle neuronal du générateur solaire de notre système par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels.

Le document présenté ici s'articule autour de cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la technologie de la réfrigération par adsorption. Nous donnons un bref historique sur les systèmes de réfrigération solaire à adsorption et les différents couples adsorbant - adsorbat

utilisés. Ainsi que, l'application de l'approche de réseaux de neurones Artificiels dans les systèmes d'ingénieries.

Le deuxième chapitre contient un rappel des connaissances du processus d'adsorption, du point de vue thermodynamique. Les principaux adsorbants et réfrigérants utilisés dans le domaine de la réfrigération solaire sont cités ainsi que leurs caractéristiques. Une description et une analyse détaillée de la question du choix du couple adsorbant – réfrigérant pour la production du froid est donnée dans ce chapitre ainsi que le mode de fonctionnement du réfrigérateur solaire à adsorption.

Dans le chapitre trois, nous donnons la description du prototype de réfrigérateur solaire utilisant le couple silicagel – eau que nous avons conçu et fabriqué. Nous accordons une attention particulière à la fabrication et à la construction ainsi qu'à l'étanchéité des différents éléments car le réfrigérateur, fonctionne à des pressions inférieures à la pression atmosphérique, et doit être parfaitement étanche. Les étapes de vérification de l'étanchéité du réfrigérateur et la réalisation du vide, sont très utiles pour le bon fonctionnement de notre système.

Le chapitre quatre présenté le mode opératoire et les résultats expérimentaux obtenus sur notre réfrigérateur solaire à adsorption. Nous présentons les interventions manuelles quotidiennes appliquées au réfrigérateur. Le fonctionnement typique du réfrigérateur est donné pour différents jours de conditions climatiques différentes, car ces unités solaires fonctionnent en plein air.

Dans le chapitre cinq, nous avons utilisé la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA), méthode qui convient parfaitement pour la résolution de systèmes complexes ayant un grand nombre de données difficiles à modéliser par les méthodes d'approximations classiques. Nous rappelons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, à savoir les modèles statiques et dynamiques. Ensuite, nous présentons les résultats de simulations du comportement thermique de notre générateur solaire, qui représente l'élément le plus influant sur la performance du système de réfrigération solaire à adsorption, en utilisant l'environnement de MATLAB®.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion finale, qui résume les résultats des tests pratiques et de simulations obtenus sur notre prototype de machine frigorifique à adsorption ainsi que les perspectives futures.

# **Chapitre-I:**

---

## **Etude bibliographique**

---

**I.1. Introduction**

L'augmentation de la demande énergétique mondiale est inévitable, notamment en raison de la croissance démographique et industrielle des pays en voie de développement. De plus, aucune politique économique et énergétique ne peut aujourd'hui ignorer la question du changement climatique liée en partie aux émissions de gaz à effet de serre.

Le recours à des sources d'énergie à la fois renouvelables (solaire, biomasse, géothermie, hydrogène, etc.) et moins agressives pour l'environnement que les sources fossiles s'avèrent incontournables pour permettre un développement énergétique durable pour les générations futures.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la technologie de la réfrigération par adsorption. Nous donnons un bref historique sur les systèmes de réfrigération solaire à adsorption et les différents couples adsorbant - adsorbat utilisés. Ainsi que, l'application de l'approche de réseaux de neurones Artificiels dans les systèmes d'ingénieries.

**I.2. Etat de l'art**

La technologie de refroidissement par adsorption utilisant l'énergie solaire est un domaine attractif de recherche et de développement car l'approvisionnement en énergie solaire et la demande de refroidissement sont les plus importants au cours de la même saison.

Plusieurs systèmes de réfrigération à adsorption ont été conçus avec succès, construits et testés avec différents couples adsorbant - adsorbat. Dans ce qui suit on donne une brève revue de la littérature récente et importante sur les systèmes frigorifiques à adsorption.

Boubakri A. et al [1] ont développé un dispositif de production de froid par adsorption basée sur l'énergie solaire. Ce système à sorption fonctionnant avec le couple charbon actif - méthanol utilise un capture plane à simple vitrage. La température atteinte dans l'évaporateur est d'environ de -6 °C et celle de désorption est de l'ordre de 100 °C pour un fonctionnement à Agadir (Maroc). Le COP expérimental du système varie de 0.08 à 0.12.

Une machine frigorifique solaire à adsorption a été développée par F. Mhiri et al [2], pour la conservation des produits agro-alimentaires ou la production d'eau glacée. Ce système utilise une capture plane d'une surface de captation de 4 m<sup>2</sup> et le couple charbon actif-méthanol. Le COP expérimental du système varie de 0.08 à 0.12.

E.E. Anyanwu et al [3] ont développé au Niger un prototype de réfrigérateur solaire par le procédé d'adsorption charbon actif-méthanol. Un capteur solaire plan à simple vitrage a été utilisé. Ce système permet d'avoir des températures dans l'évaporateur variant de 1 à 8 °C et des températures de régénération du sorbant comprises entre 80 et 100 °C. Le COP du cycle obtenu avec leur prototype varie entre 0.056 et 0.093.

En Espagne, un réfrigérateur solaire à adsorption fonctionnant avec le couple charbon actif – méthanol et utilisant un capteur plan à simple vitrage avec des collecteurs sous forme cylindro - parabolique a été développé et testé par M.I. Gonzalez et al [4]. Ce prototype a permis d'atteindre des températures de production du froid de -7 °C. Le COP expérimental du système obtenu sur la période de tests varie entre 0.078 et 0.096.

En Suisse, un prototype à haute performance fonctionnant avec le couple silicagel – eau et utilisant un capteur solaire plan simple vitrage a été développé par Hildbrand et al [5]. Le sorbant est placé directement au sein du capteur solaire qui présente également la caractéristique de pouvoir s'ouvrir au cours de la nuit afin d'augmenter la convection naturelle et favoriser le refroidissement du sorbant. Ce système de production de froid a présenté des performances intéressantes, avec un COP solaire de 0.16.

F. Lemmini et al [6], ont construit et testé une machine de réfrigération solaire par adsorption fonctionnant avec le couple charbon actif AC35 - méthanol. Ce prototype a permis d'atteindre des températures dans l'évaporateur de l'ordre de -11°C. Les résultats des tests effectués sur la machine installée sur un site à Rabat au Maroc ont montré que son COP solaire varie de 0.05 à 0.08.

Leite et al [7], ont construit un système de réfrigération solaire par adsorption qui utilise un capteur à éléments tubulaires fonctionnant avec le couple charbon actif – méthanol. Ce prototype a été testé dans les conditions météorologiques du Brésil. Il a permis d'atteindre des températures dans l'évaporateur de l'ordre de - 4°C. Les résultats expérimentaux ont montré que le COP solaire maximal était de 0.085.

Nidal H. Abu Hamdeh et al [8], ont étudié expérimentalement un nouveau prototype de réfrigérateur solaire par adsorption utilisant le couple charbon actif – méthanol. Les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation de la masse d'adsorbant influe sur le coefficient de performance.

M. Li et al [9] ont testé un prototype de réfrigération solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif - méthanol. Ce prototype permet de produire environ 4.5 kg de glace. Le COP solaire du cycle du prototype a atteint une valeur de 0.12 au cours des tests.

Au Burkna-faso, Buchter et al [10], ont développé et testé un système de réfrigération solaire avec le procédé d'adsorption fonctionnant avec le couple charbon actif - méthanol. Leur prototype utilise un capteur solaire plan à simple vitrage. Il a permis de produire de la glace. Le COP solaire expérimental obtenu avec le prototype durant la période des tests varie de 0.087 à 0.131.

Berdja et al [11], ont construit un petit prototype de réfrigérateur qui utilise le couple charbon actif - méthanol, comme paire de travail, et dans lequel l'énergie solaire est simulée par un projecteur. Ce prototype a un COP solaire égal à 0.081.

X. Ji et al [12], ont construit et testé un système de réfrigération à adsorption solaire qui utilise le couple charbon actif - méthanol avec un nouveau design de collecteur d'adsorbant afin d'améliorer le transfert de chaleur dans le lit d'adsorbant. Les résultats expérimentaux montrent que la température de l'évaporateur a atteint la valeur de 0 °C et que le COP solaire de leur système varie de 0.039 à 0.12.

Q.W. Pan et al [13], ont développé et testé un prototype de réfrigérateur utilisant le chlorure de calcium - ammoniac comme réfrigérant. Les résultats expérimentaux montrent que la température dans l'évaporateur a atteint la valeur de - 5 °C, que la capacité de refroidissement est de 1.64 kW, et enfin le coefficient de performance optimal est de 0.19.

A. Boubakr [14], a présenté une nouvelle conception de réfrigérateur solaire à adsorption afin d'optimiser la performance de son système. Le couple de fonctionnement est le charbon actif – méthanol. Ce système a permis d'obtenir un COP expérimental de 0.12.

Z.S. Lu et R.Z. Wang [15], ont construit un petit système de réfrigérateur solaire par adsorption fonctionnant avec le couple gel de silice - eau, puis l'ont testé expérimentalement. Les résultats expérimentaux indiquent que sa capacité de refroidissement varie entre 13 et 21 kW et que le COP expérimental est égal à 0.15.

Zisheng Lu et al [16], ont conçu un système de réfrigération à adsorption fonctionnant avec une masse de 65 kg de gel de silice. Les résultats expérimentaux, dans les conditions météorologiques de Dezhou en Chine, ont montré que la capacité de refroidissement et le COP solaire moyen étaient respectivement de 17.6 kW et 0.16.

L'amélioration de l'efficacité, des dispositifs solaires d'adsorption, a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le tableau (I.1), nous avons listés l'essentiel, de ces études expérimentales et numériques relatives aux systèmes de réfrigérations solaires à adsorption et les différentes couples adsorbant – adsorbat utilisées.

Couple utilisé (Adsorbant - adsorbat)	Type de capture et surface (m <sup>2</sup> )	Radiation globales (MJ)	Tev (°C)	COP de système	Réf.	Type d'étude
<b>Charbon actif-méthanol</b>	Capteur plan, 6 m <sup>2</sup>	16-19	-5	0.1-0.12	[17]	Expérimentale
	Capteur plan avec tubes, 0.97m <sup>2</sup>	/	-7 à-12	0.1-0.123	[18]	Expérimentale
	Capteur CP, 2m <sup>2</sup>	26.8	-6	0.02	[19]	Expérimentale
	Capteur plan, 0.97m <sup>2</sup>	17-19	-6	0.1-0.12	[20]	Expérimentale
	Capteur plan, 1m <sup>2</sup>	17.4	/	0.115	[21]	Expérimentale
	Capteur plan, 1.5m <sup>2</sup>	28-30	/	0.13-0.14	[22]	Expérimentale
	Capteur- réflectance	17-20	/	0.136-0.159	[23]	Expérimentale
	Capture plan, 1.2 m <sup>2</sup>	15-23	/	0.083-0.127	[24]	Expérimentale
	Capteur plan avec tubes	12.4-25.2	/	0.07-0.11	[25]	Expérimentale
	Capteur plan avec tubes, 1.2m <sup>2</sup>	28.7	-12.8	0.08	[26]	Expérimentale
	Capteur plan, 1m <sup>2</sup>	22	/	0.09	[27]	Expérimentale
	Capteur plan	19-22	/	0.1-0.12	[28]	Expérimentale
	Capteur plan 0.8m <sup>2</sup>	/		0.067	[29]	Experimental
	Capteur plan avec tubes, 1m <sup>2</sup>	20-23	-2	0.124-0.155	[30]	Simulation
	Capteur plan, 0.4m <sup>2</sup>	21.6	5	0.18	[31]	Simulation
	Capteur plan, 1m <sup>2</sup>	27	-10	0.14	[32]	Simulation
	Capteur plan, 2m <sup>2</sup>	/	0	0.024	[33]	Simulation
	Capture plan, 2m <sup>2</sup>	24.18	-5	0.618 (cycle)	[34]	Simulation
Capteur plan avec tubes, 1m <sup>2</sup>	24.84	-4	0.24	[35]	Simulation	
Capteur plan, 5m <sup>2</sup>	/	8	0.12	[36]	Simulation	
<b>Charbon actif-ammoniac</b>	Capteur plan avec tubes, 1.4m <sup>2</sup>	/	-1	0.04	[37]	Expérimentale
	Capteur plan avec tube, 1.4m <sup>2</sup>	13.8-19.8	0	0.061-0.071	[38]	Expérimentale
	Capteur CP, 140m <sup>2</sup>	23	-10	0.43 (cycle)	[39]	Expérimentale
	Capteur CP	/	0	0.144	[40]	Simulation
	Capteur plan avec tubes	/	/	0.105	[41]	Simulation
	Capteur CP	/	/	0.18	[42]	Simulation
<b>Zéolite – Eau</b>	Capteur plan, 20m <sup>2</sup>	17.8-25.3	-2.5, 1	0.1	[44]	Expérimentale
	Capteur CP	/	5	0.33	[45]	Simulation
	Capteur CP, 1m <sup>2</sup>	14.7	11	0.8 (cycle)	[46]	Expérimentale
	Capteur sous vide, 3m <sup>2</sup>	25.9	0	0.08	[47]	Expérimentale
	Capteur plan, 0.25m <sup>2</sup>	/	5	0.2	[48]	Simulation

<b>Silicagel- Eau</b>	Capteur plan avec tubes	/	4	0.055	[49]	Expérimentale
	Capteur plan avec tube, 1m <sup>2</sup>	23.8	5	0.17	[50]	simulation
	Capteur plan, 1m <sup>2</sup>	/	0	0.07	[51]	Expérimentale
<b>Charbon actif -Éthanol</b>	Capture plan, 00.94m <sup>2</sup>	18.2	/	0.029	[52]	Expérimentale
<b>SrCL<sub>2</sub>- Ammoniac</b>	Capteur sous vide, 2.1m <sup>2</sup>	26	/	0.081	[53]	Expérimentale
	Capteur plan	/	-5	0.05-0.08	[54]	Expérimentale
	Capteur sous vide	20	-15	0.069	[55]	Expérimentale
<b>CaCL<sub>2</sub>- Ammoniac</b>	Capteur plan	/	/	0.14	[56]	Simulation
<b>Silicagel, LiCl- Méthanol</b>	Capteur plan, 1.5m <sup>2</sup>	/	/	0.33	[57]	Simulation

**Tableaux I.1.** Différents systèmes de réfrigération par adsorption

La modélisation mathématique et la simulation numérique permettent d'éviter la réalisation d'un certain nombre d'expériences souvent coûteuses et répétitives.

Les modèles numériques classiques ont besoin d'un grand nombre de paramètres qui définissent le système, comme les propriétés physiques, géométriques et thermodynamiques, qui parfois ne sont pas facilement disponibles, et leurs prédictions peuvent ne pas être suffisamment précises dans de nombreux cas.

Les réseaux de neurones ont prouvé leur efficacité dans plusieurs domaines de l'ingénierie pour la prédiction, l'identification, le contrôle, etc...., [58], [59], [60], [61]. Dans les systèmes de réfrigération à sorption, nous constatons que le recours aux réseaux de neurones artificiels devient de plus en plus fréquent [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68].

L'application de l'approche de réseau neuronal statique ou dynamique, peut être utilisée entre autre pour la prédiction des paramètres de performance des capteurs solaires [69], [70]. Les avantages de cette approche par rapport aux méthodes classiques sont la rapidité, la simplicité, la capacité du réseau à prédire et l'étude du comportement thermique des collecteurs solaires à différentes conditions de fonctionnement.

Une approche de modélisation du comportement thermique des capteurs solaire, en particulier la distribution de la température de sortie sont décrites par [71]. Un modèle de réseau neuronal a été formé avec succès pour trois types de capteurs solaires différents (air, eau et stockage de chaleur latente) en utilisant les données mesurées.

Une nouvelle formule basée sur la technique des réseaux neuronaux artificiels (ANN) a été développée pour déterminer l'efficacité du capteur solaire plan [72]. La fonction de transfert sigmoïde a été utilisée dans le réseau. Les données météorologiques ont été utilisées

comme données d'entraînement pour former le réseau neuronal. La température de la surface de collecteur, l'heure, le rayonnement solaire, l'angle de déclinaison et l'angle d'inclinaison sont utilisés dans la couche d'entrée du réseau. Le rendement du capteur solaire est utilisé comme une couche de sortie.

Une étude théorique de performance d'un capteur solaire à l'aide d'un réseau neuronal artificiel a été développée par [73]. L'étude porte sur l'évaluation de la sensibilité du réseau de neurone artificiel à différentes combinaisons de paramètres d'entrée ainsi que la détermination de la quantité minimale d'intrants nécessaires pour modéliser avec précision la performance des capteurs solaires.

Trois modèles neuronaux (non-linéaires autorégressifs exogènes (NARX), Elman et multicouches), ont été utilisés pour estimer la performance de deux collecteurs solaires plans par [74]. Ils ont aussi été utilisés pour estimer la sensibilité des modèles neuronaux à différentes combinaisons de paramètres d'entrées ainsi que pour déterminer la quantité minimale d'intrants.

Un modèle de réseau neuronal artificiel a été développé pour l'analyse de transfert de chaleur dans un capteur solaire à air chaud [75]. La température intérieure moyenne à chaque surface du capteur solaire et le flux d'air ont été estimés par ce modèle non-linéaire autorégressif exogène (NARX). Les résultats obtenus à l'aide du modèle NARX sont en excellent accord ( $R= 0,99997$ ) avec les résultats expérimentaux. Il peut être utilisé pour prédire la température intérieure du collecteur solaire.

Une étude de simulation du comportement thermique transitoire, du collecteur d'un adsorbeur à tube, par l'approche de réseau de neurones autorégressif non linéaire NARX a été développée par [76]. Les prédictions, du réseau neuronal, sont d'une excellente précision en les comparant avec les valeurs expérimentales. L'erreur quadratique moyenne est proche de 0 et le coefficient de régression ( $R$ ) est très proche de 1.

## **Chapitre-II:**

---

# **Principe de la réfrigération par adsorption par énergie solaire**

---

### **II.1. Introduction**

Parmi les procédés de transformation thermique de l'énergie solaire, il y a lieu de citer la réfrigération solaire par sorption. Cette dernière représente une excellente application dans le domaine du froid industriel et domestique à cause des problèmes liés à l'évolution actuelle du contexte énergétique mondial, les problèmes écologiques et l'augmentation de la demande énergétique. C'est d'ailleurs ce qui explique l'importance de la recherche depuis quelques années dans le domaine des énergies renouvelables.

Dans ce chapitre, nous présentons un rappel des connaissances du processus d'adsorption, du point de vue thermodynamique. Les principaux adsorbants et réfrigérants utilisés dans le domaine de la réfrigération solaire sont cités ainsi que leurs caractéristiques.

### **II.2. Procédés de transformation thermique de l'énergie solaire**

Les systèmes de réfrigération par adsorption présentent l'avantage d'être absolument inoffensif pour l'environnement, car ils ont un potentiel d'appauvrissement de l'ozone, et de réchauffement climatique nul. En comparaison avec les systèmes classiques existants, les systèmes frigorifiques à adsorption peuvent être construits à petite échelle et peuvent être exploités sans pièces mobiles. A noter aussi, qu'il n'existe pas de problème de corrosion dans les systèmes de réfrigération à adsorption. Les technologies les plus utilisées sont listées dans la figure (II.1).

### **II.3. Principe du phénomène d'adsorption**

L'utilisation du phénomène d'adsorption se retrouve dans plusieurs processus industriels comme par exemple le séchage, la déshumidification, le traitement d'air, la purification, etc... [77]. Il nous apparaît important d'exploiter cette technique dans le domaine de la production du froid.

L'adsorption est le processus au cours duquel des molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé « adsorbat », viennent se fixer sur la surface d'un solide appelé « adsorbant ». Par la surface du solide, on sous-entend les surfaces externes et internes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant [78].

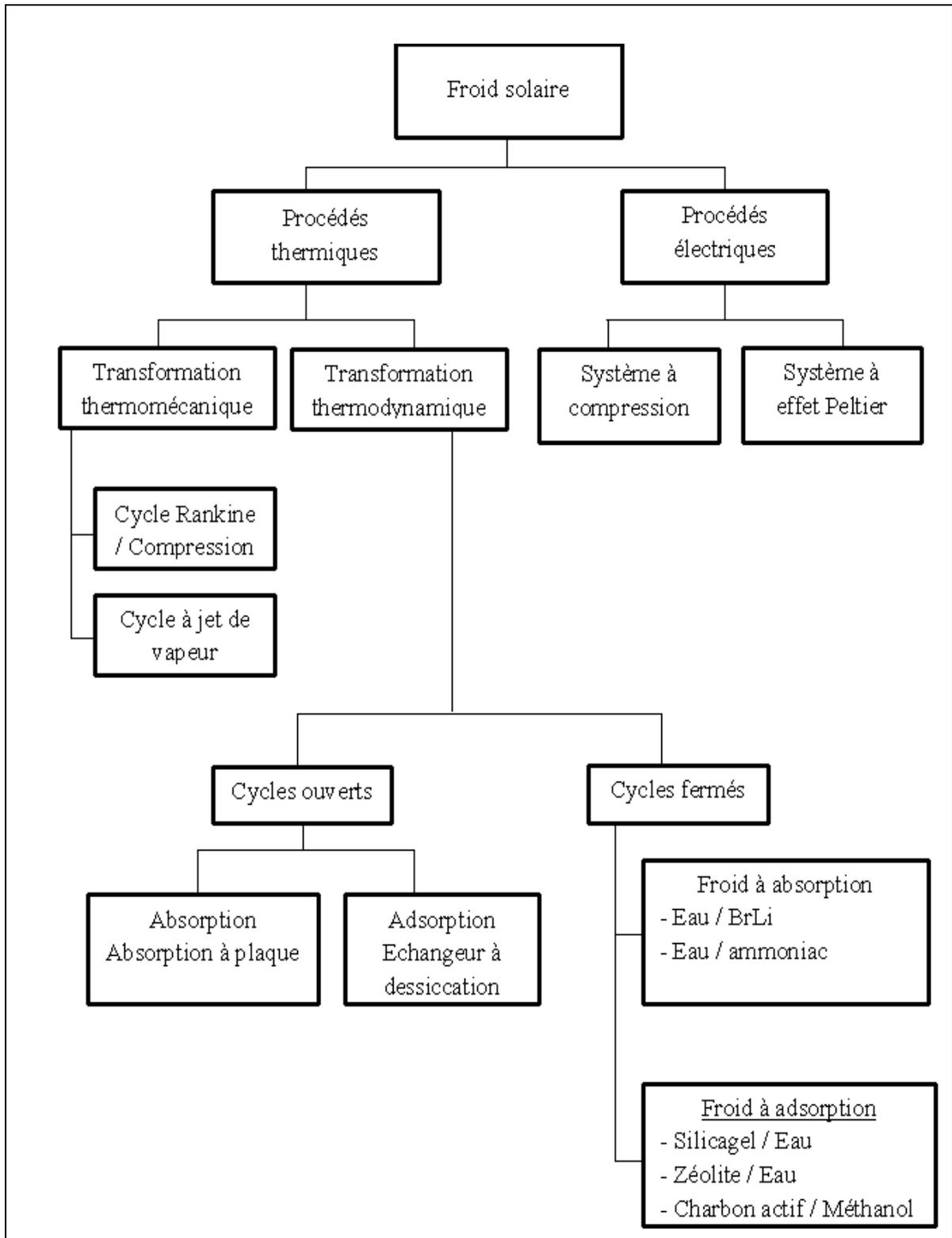
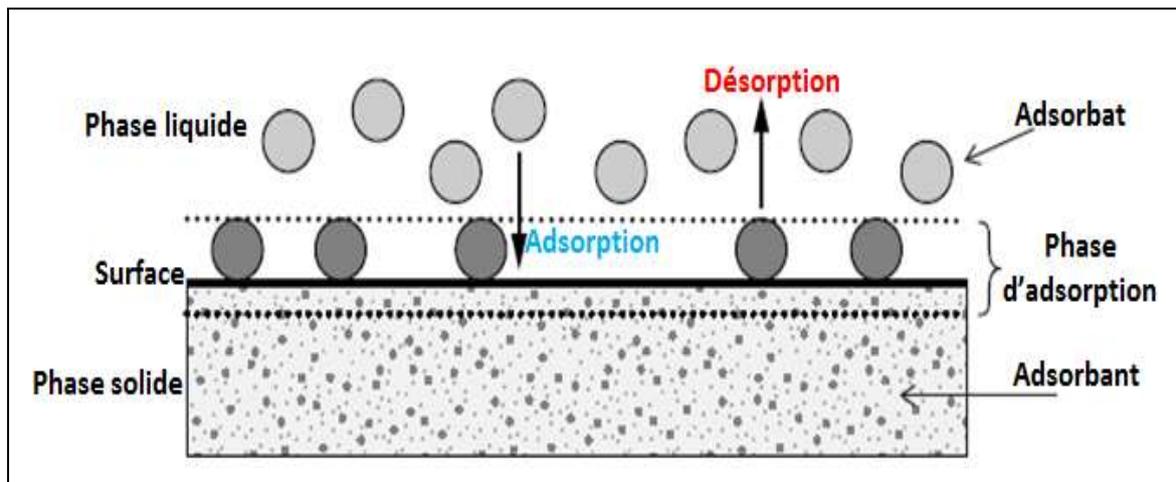


Figure II.1. Technologies du froid solaire [79], [80], [81]

Dans la théorie de l'adsorption, les termes de base sont représentés sur la figure (II.2). Un matériau solide qui présente la surface pour l'adsorption est désigné sous le nom d'adsorbant et les molécules qui sont adsorbées sont appelées les adsorbats. Les espèces adsorbées peuvent être libérées de la surface et être transférées de nouveau dans la phase fluide. Ce processus inverse est désigné sous le nom de désorption.



**Figure II.2.** Processus de l'adsorption [77]

- L'adsorption est un processus exothermique qui se produit donc avec un dégagement de chaleur, ce qui peut conduire à un échauffement du solide et à une réduction de la quantité adsorbée [78].
- La vitesse, la capacité et la chaleur d'adsorption diminuent lorsque la charge (fraction adsorbée) de l'adsorbant augmente [78].
- Lorsqu'un adsorbant atteint la saturation, on procède généralement à sa régénération. À l'inverse de l'adsorption, cette opération de désorption est favorisée par des températures comprises entre 90°C et 140 °C ainsi que par de faibles concentrations d'adsorbat.

### II.3.1 Adsorption physique

L'adsorption d'un gaz (adsorbat) par un solide se traduit par une augmentation de la densité du gaz à l'interface des deux phases. L'adsorption est dite adsorption physique lorsqu'elle est due à des forces d'interactions physiques entre les atomes, ou groupements d'atomes du solide et les molécules de gaz [78]. Ces interactions sont importantes entre molécules polaires ou ioniques. La polarisation des molécules du gaz à l'intérieur du champ électrique de la surface du solide produit un potentiel d'interaction très important. Ce

potentiel dépend de l'intensité du champ électrique à la surface de l'adsorbant et de la polarisabilité des molécules de gaz. Ce type d'interactions se rencontre dans le cas des adsorbants contenant des ions (zéolites). L'adsorption physique se produit sans modification de la structure moléculaire et elle est parfaitement réversible (les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées).

### II.3.2 Adsorption chimique

Dans le cas de l'adsorption chimique, il y a création de liaisons entre les atomes de la surface et les molécules de l'adsorbat. Les énergies d'adsorption peuvent être de l'ordre 200 kJ/mole [78] (~20 kJ/mole dans le cas de l'adsorption physique). Ce type d'adsorption intervient dans le mécanisme des réactions catalytiques hétérogènes, où le catalyseur crée des liaisons fortes avec les gaz adsorbés. La chimie-sorption est complète quand tous les centres actifs présents à la surface ont établi une liaison avec les molécules de l'adsorbat. Dans le cas de la formation d'une liaison chimique spécifique, on peut envisager différents types de liaisons [78] :

- Soit une liaison purement ionique dans laquelle l'atome ou l'ion joue le rôle de donneur ou d'accepteur d'électron.
- Soit une liaison covalente.

Le tableau (II.1) donne les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [82].

Adsorption physique	Adsorption chimique
- faible chaleur d'adsorption	- forte chaleur d'adsorption
- non spécifique	- spécifique
- monocouche ou multicouche	- monocouche seulement
- rapide, réversible, non active	- active, irréversible, lente
- pas de transfert d'électrons	- transfert d'électrons

**Tableau II.1.** Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique

### II.4. Thermodynamique de l'adsorption

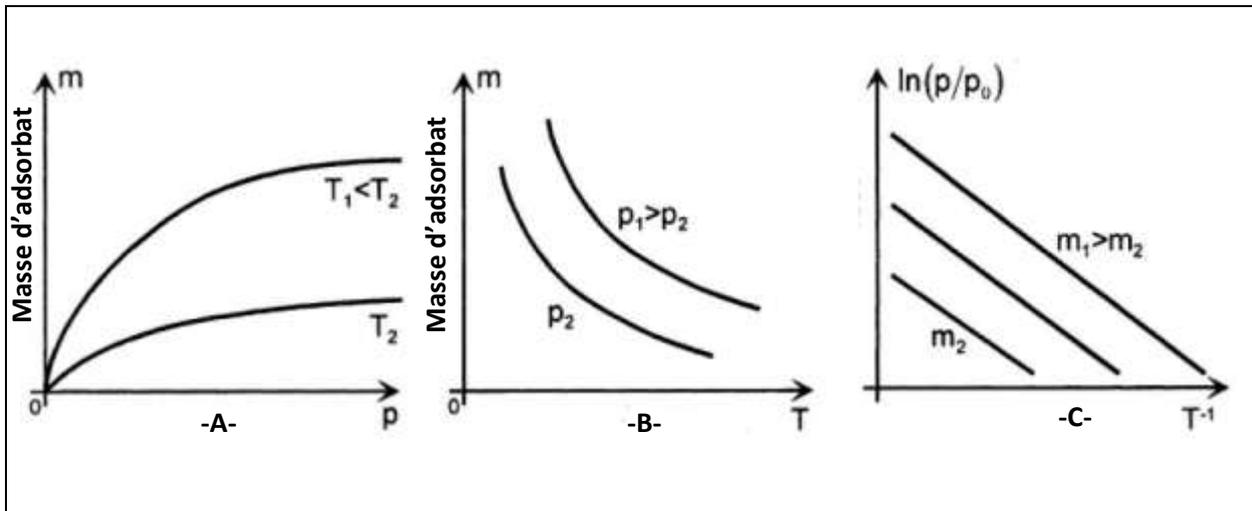
L'état thermodynamique d'un couple adsorbant-adsorbat est caractérisé par une relation entre trois grandeurs: masse, pression et température (m, P et T) [81], [83]. La détermination

de la forme de cette relation est relatée dans la littérature traitant de la thermodynamique de l'adsorption.

L'équilibre d'adsorption est représenté par les courbes suivantes :

- isotherme d'adsorption  $(m, P)_T$ .
- isobare d'adsorption  $(m, T)_P$ .
- isostère d'adsorption  $(P, T)_m$ .

Les représentations graphiques des différentes données de l'équilibre d'adsorption sont listées dans la figure (II.3).

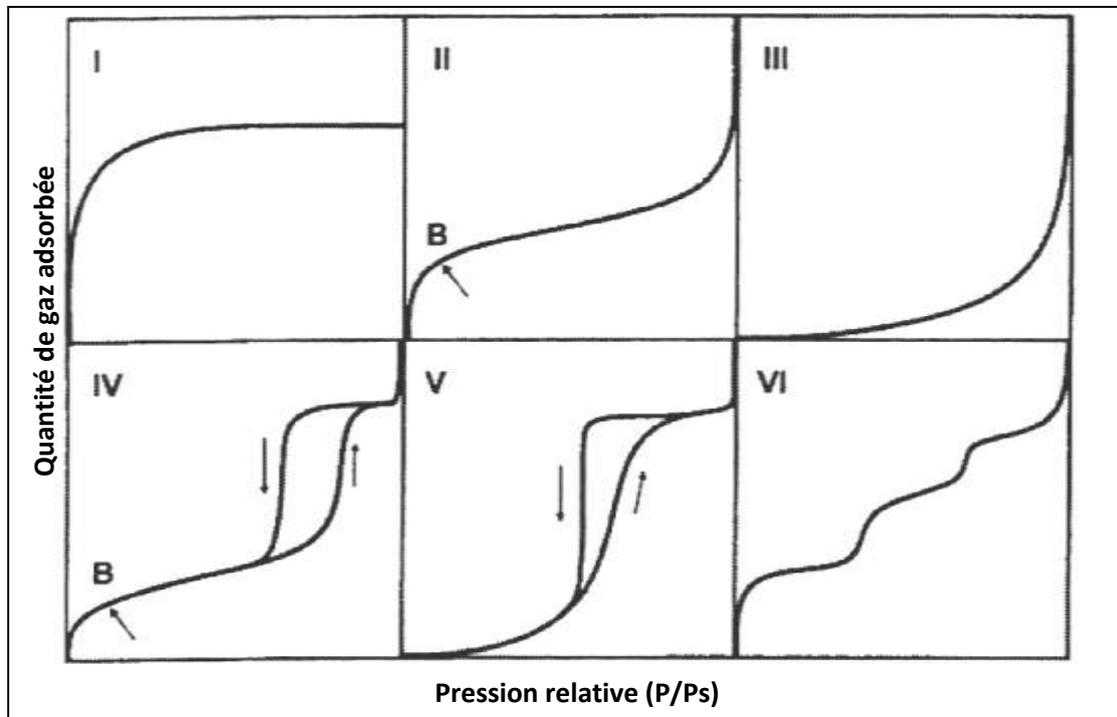


**Figure II.3** Représentations graphiques des différents équilibres d'adsorption  
A :  $(T = \text{cste})$ , B :  $(T = \text{cste})$ , C :  $(m = \text{cste})$

De façon pratique, pour l'étude des systèmes frigorifiques à adsorption, on utilise les isothermes d'adsorption, qui représentent, en fonction de la pression de vapeur, la quantité de gaz adsorbée par kilogramme d'adsorbant à la température  $(T)$ . Les isothermes d'adsorption présentées ont des formes variables et peuvent être regroupées en six types [83], comme le montre la figure (II.4).

- Les isothermes de type I sont typiques d'une adsorption en monocouche, ou correspondant au remplissage de micropores avec saturation lorsque le volume à disposition est totalement rempli. Ce type d'isothermes est caractéristique pour l'adsorption sur le charbon micropores et les zéolites.
- Les isothermes de type II, au contraire, correspondant en générale à l'adsorption multicouche sur des surfaces ouvertes.

- L'isotherme de type III est relativement rare, elle représente le cas où l'interaction adsorbant/adsorbat est faible par rapport aux interactions adsorbat/adsorbat, mais suffisante pour accroître la tendance des molécules à s'accumuler à la surface de l'adsorbant.



**Figure II.4.** Types d'isothermes d'adsorption [83]

- L'isotherme de type IV peut résulter de la formation de deux couches successives d'adsorbat à la surface du solide quand les interactions entre les molécules du fluide frigorigène et la surface solide sont plus fortes que les interactions entre les molécules adsorbées. Dans ce cas, les sites d'adsorption de la seconde couche ne commencent à se remplir que quand la première couche est à peu près complète.
- L'isotherme de type V traduit l'existence de plus fortes interactions intermoléculaires que les forces d'interaction entre les molécules du fluide frigorigène et le solide.
- Les isothermes de type VI présentent des marches caractéristiques d'adsorption multicouche sur une surface non poreuse très homogène.

#### II.4.1 Le modèle de Langmuir

Langmuir a développé le modèle d'adsorption mono-moléculaire fondé sur des bases théoriques en faisant les hypothèses suivantes:

- Les sites d'adsorption à la surface du solide sont tous énergiquement équivalents ;

- Chacun des sites ne peut fixer qu'une seule molécule ;
- L'adsorption se fait en monocouche ;
- Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées.

La forme classique du modèle de Langmuir est donnée par, [83] :

$m(P, T, m_s) = m_{\infty}(P, T, m_s) \frac{b(T)P}{1 + b(T)P}$	(II. 1)
--	---------

$m$  : Masse de l'adsorbat

$m_{\infty}$  : Valeur limitée de la masse adsorbée à  $T = \text{cste}$

$m_s$  : Masse du matériau sorbant

$P$  : Pression d'équilibre

$T$  : Température

$b(T)$  : Paramètre de Langmuir donné par :

$b(T) = \frac{1}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \exp\left(\frac{q}{RT}\right)$	(II. 2)
---	---------

$q$  : Chaleur spécifique de l'adsorption

#### II.4.2 Modèle de Brunauer, Emmett et Teller (BET)

Le modèle de BET est basé sur une adsorption en multicouche où chacune des couches obéit à la théorie de Langmuir [72]. Brunauer, Emmett et Teller ont donné une interprétation théorique de l'isotherme d'adsorption par l'équation suivante [83]:

$\frac{n}{n_1} = \frac{C \left(\frac{P}{P_s}\right)}{\left(1 - \left(\frac{P}{P_s}\right)\right) \left(1 + (C-1) \left(\frac{P}{P_s}\right)\right)}$	(II. 3)
--	---------

$n$  : Quantité de gaz adsorbée à la température  $T$  et à la pression  $P$

$n_1$  : Quantité de gaz adsorbée par monocouche

$C$  : Paramètre du modèle BET

$P_s$  : Pression de saturation

### II.4.3 Théorie de Polanyi et équation de Dubinin

La théorie du potentiel d'adsorption est proposée par Polanyi [81], qui considère que l'interaction entre les molécules du réfrigérant et la surface d'adsorbant sont déterminées par un champ de potentiel ( $\epsilon$ ). Cette théorie a été étudiée du point de vue thermodynamique. Le potentiel d'adsorption est déterminé par les composants et la structure des pores d'adsorbants. Polanyi pense que le potentiel d'adsorption ( $\epsilon$ ) peut être exprimé par :

$\epsilon = RT \ln \left( \frac{P_s}{P} \right)$	(II. 4)
--	---------

Avec :

$P_s$  : Pression de saturation à la température T

R : Constante des gaz parfaits

A partir du potentiel de Polanyi, Dubinin et Radushkevich ont développé un modèle théorique thermodynamique qui détermine le volume occupé par l'adsorbat à la surface totale d'un adsorbant [75] :

$V = V_0 \exp \left[ - \left( \frac{B}{\beta^2} \right) \epsilon^2 \right]$	(II. 5)
---	---------

B : Paramètre des structures de pores de l'adsorbant

$\beta$  : Coefficient d'affinité

En remplaçant ( $\epsilon$ ) par sa relation dans l'équation (II.5), on obtient l'équation (II. 6).

$V = V_0 \exp \left[ - \left( \frac{B}{\beta^2} \right) \left( RT \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^2 \right]$	(II. 6)
---	---------

La corrélation entre la température et la pression de saturation pour l'adsorbat peut être représentée par l'équation de Clausius-Clapeyron [84]:

$\ln P = A - \frac{C}{T_{sat}}$	(I. 7)
---------------------------------	--------

Où :

A, C : Sont des constantes dépendant de l'adsorbat (réfrigérant)

L'équation (II.6) s'écrit par substitution de l'équation (II.7) dans cette dernière sous la forme (II. 8) :

$$V(T, T_{sat}) = V_0(T_{sat}) \exp \left[ - \left( \frac{B}{\beta^2} \right) \left( RC \frac{T}{T_{sat}} - RC \right)^2 \right] \quad (\text{II. 8})$$

En introduisant la masse volumique dans l'équation (II.8), on peut simplifier l'équation (II.9) en remplaçant le volume de l'adsorbat par la masse. La généralisation de l'équation [84] devient alors :

$$M(T, T_{sat}) = M_0(T_{sat}) \exp \left[ -K \left( \frac{T}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \quad (\text{II. 9})$$

Avec :

T: température de l'adsorbant (K)

$T_{sat}$ : Température de saturation (K)

n: Paramètre ajustable, permettant d'améliorer la corrélation des données expérimentales

K: Coefficient dépendent du couple adsorbant – adsorbat

$$K = \left( \frac{B}{\beta^2} \right) (RC)^n \quad (\text{II. 10})$$

#### II.4.4 Isostères d'adsorption

La relation donnant les pressions d'équilibres en fonction de la température pour une quantité de réfrigérant « m » constante est appelée « isostère ». Généralement les isostères sont représentées par l'équation empirique de type Clausius Clapeyron.

### II.5 Couples adsorbants / adsorbats

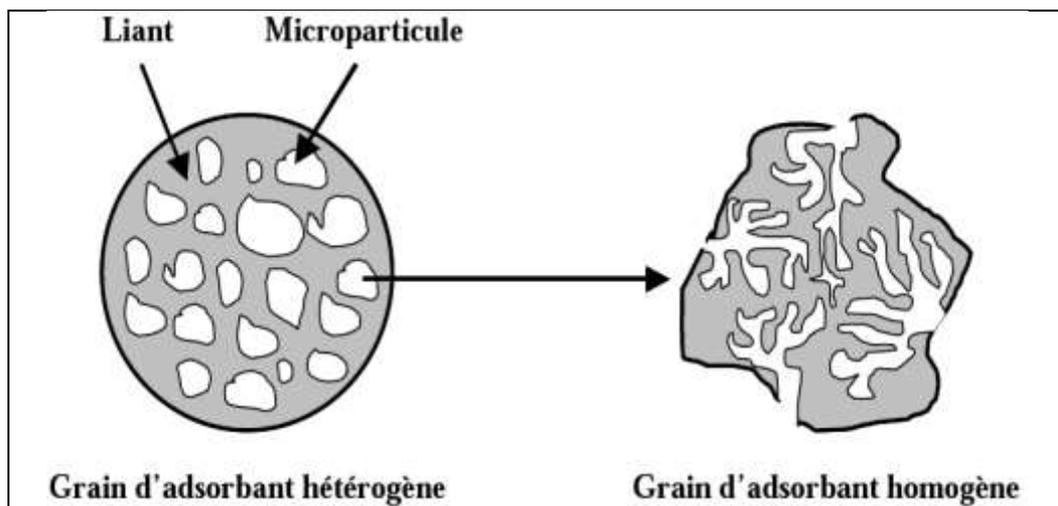
#### II.5.1 Obtention des adsorbants

Au sens strict, tous les solides sont des adsorbants. Cependant seuls les adsorbants ayant une surface spécifique suffisante (surface par unité de masse) peuvent avoir des intérêts pratiques. Les adsorbants industriels ont généralement des surfaces spécifiques au-delà de 100 (m<sup>2</sup>/Kg) [78]. Les adsorbants industriels les plus courants sont les suivants [78]: Charbons actifs ; zéolites, gels de silice, alumines activées et Tamis moléculaires carbonés.

Généralement, les adsorbants doivent d'abord être agglomérés à l'aide de liant pour obtenir des grains de dimensions convenables (de l'ordre du millimètre), de bonne porosité et de résistance mécanique suffisante. Ces grains peuvent être cylindriques (obtenus par extrusion) ou sphériques (obtenus par granulation).

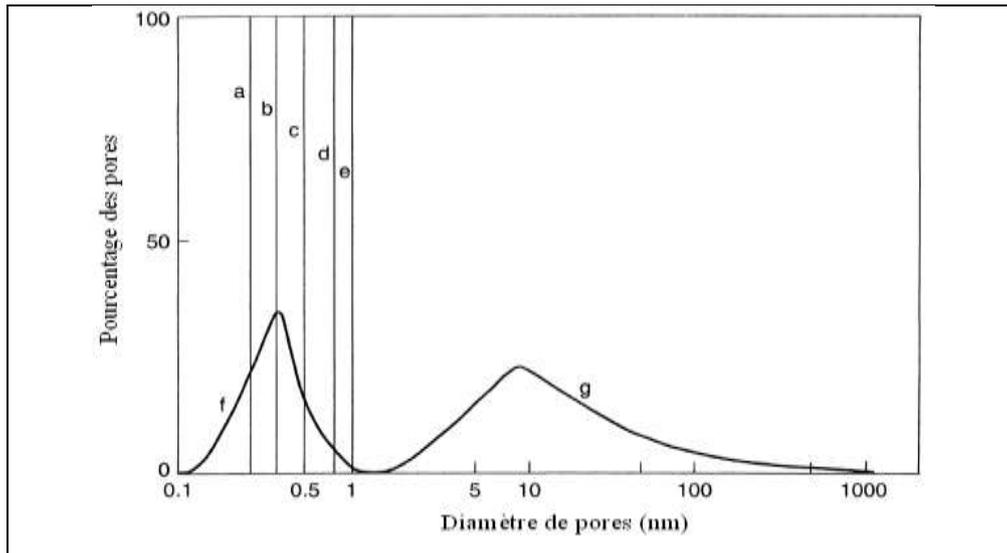
La figure (II.5) permet de distinguer deux grandes classes d'adsorbants selon leur structure :

- les adsorbants homogènes dont la structure poreuse s'étale sur toute l'échelle d'un grain tels que les charbons actifs;
- les adsorbants hétérogènes dont les grains sont constitués de microparticules d'adsorbant homogène agglomérées par un liant telles que les zéolithes.



**Figure II.5** Structures de grains d'adsorbants hétérogènes et homogènes [85]

Les espaces entre ces cristallites forment les pores dont la distribution des tailles est assez large et va des micropores ( $< 2\text{nm}$ ) aux mésopores ( $2\text{-}50\text{ nm}$ ) et aux macropores ( $> 50\text{ nm}$ ). La figure (II.6) donne la distribution de la taille des micropores pour différents adsorbants utilisés dans le domaine de la réfrigération.



**Figure II.6** Distribution de la taille des pores (a) zéolite type 3A, (b) 4A, (c) 5A, (d) 10X, (e) 13X, (f) tamis carboné et (g) charbon actif [86]

### II.5.2 Caractérisation des adsorbants

Un adsorbant se caractérise par des propriétés physiques et chimiques intrinsèques comme présentées ci-dessous.

#### II.5.2.1 Propriétés physiques

- forme (poudres, granulés...)
- Surfaces spécifiques ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
- Distribution de diamètre de pores
- Volume poreux, densités (apparente, réelle)

Le tableau (II.2) récapitule les valeurs des caractéristiques physico-chimiques pour différents matériaux adsorbants industriels.

Adsorbant	Surface spécifique ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ )	Taille des pores (nm)	Porosité interne	Masse volumique apparente ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
Charbons actifs	400 à 2000	1,0 à 4,0	0,4 à 0,8	300 à 600
Zéolites	300 à 600	0,3 à 0,8	0,35 à 0,5	500 à 700
Gels de silice	500 à 800	0,3 à 0,8	0,3 à 0,4	600 à 750
Alumines activées	600 à 800	2,0 à 5,0	0,4 à 0,5	700 à 800
Tamis carbonés	200 à 400	1,0 à 6,0	0,3 à 0,6	800 à 950
Adsorbant à base de polymère	100 à 700	4,0 à 20	0,4 à 0,6	400 à 700

**Tableau II.2.** Principales propriétés physiques et chimiques des adsorbants [78]

### II.5.2.2 Propriétés chimiques

- Affinités polaires (hydro-phyle / phobe) et teneur en eau
- Teneur en composés solubles
- Taux de cendres

### II.5.3 Adsorbants / adsorbats

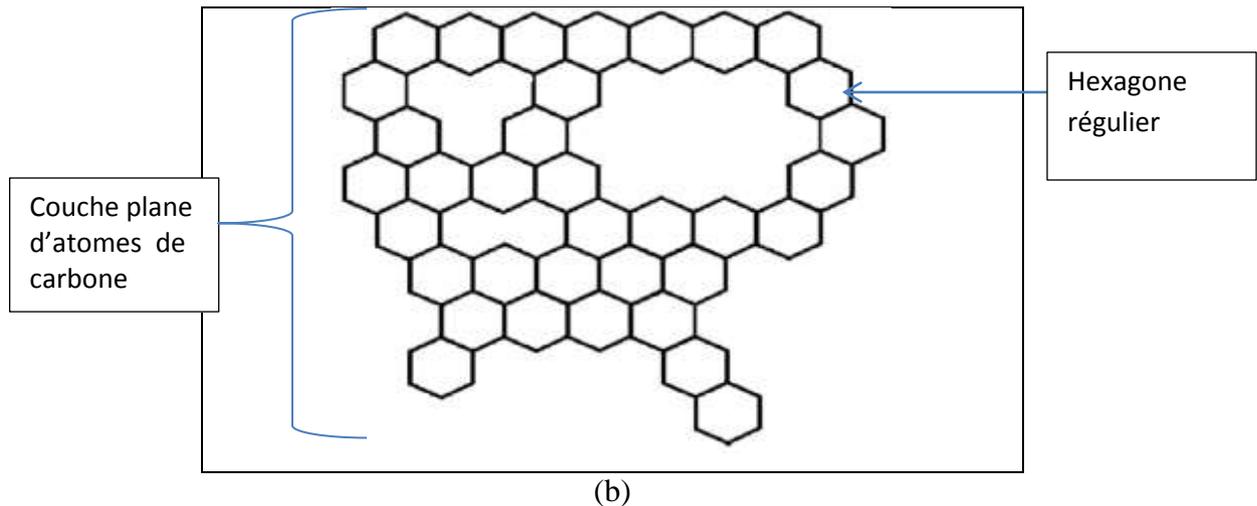
#### II.5.3.1 Charbon actif

Cette appellation regroupe le charbon actif et les matériaux à base de fibre de carbone. Les premiers se présentent sous forme de poudre, granulés ou extrudés tandis que les seconds sont disponibles sous forme de tissus, feutres ou mats. Les charbons actifs sont largement utilisés dans les applications industrielles qui comprennent : la récupération des solvants, la purification, le traitement de l'eau, le contrôle des composés organiques volatils, etc....

Les charbons actifs sont obtenus par la décomposition thermique de différents matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétrolier, etc...). Les grains et la structure du charbon actif sont présentés respectivement sur les figures (II.7.a et II.7.b).



**Figure II.7.a** Grains de charbon actif



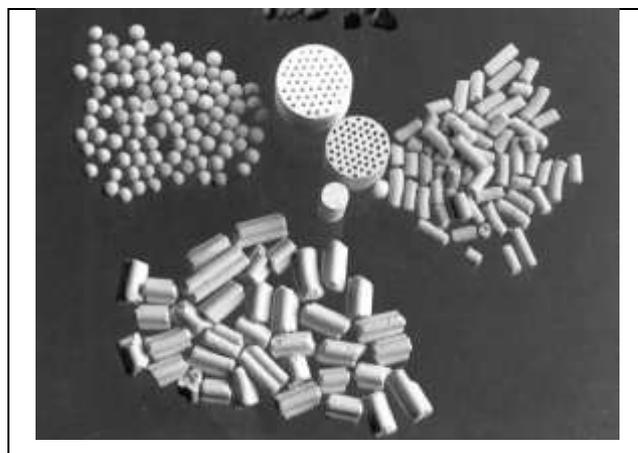
**Figure II.7.b** Structure moléculaire du charbon actif [81]

Les charbons actifs sont des adsorbants hydrophobes, composés de micro-cristallites élémentaires de graphite qui sont assemblées avec une orientation aléatoire.

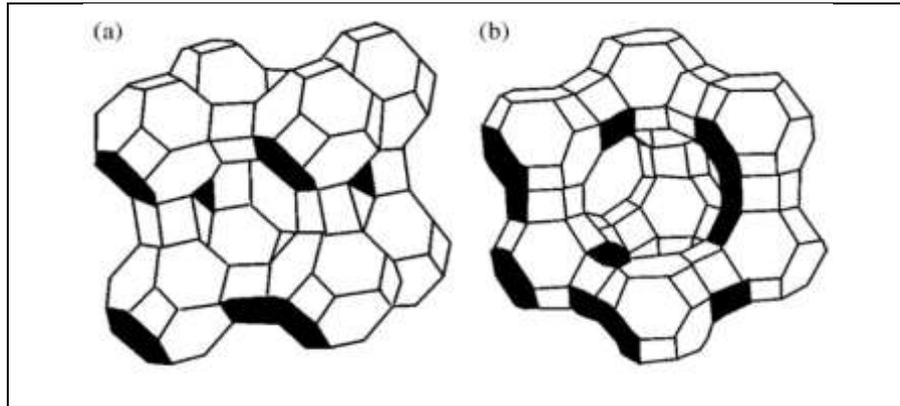
### II.5.3.2 Zéolithe

Les zéolites, comme le montre la figure (II.8.a), sont des alumines silicates cristallins et poreux, résultant des enchaînements de tétraèdres de  $SiO_4$  et  $AlO_4$ .

Ces tétraèdres sont reliés entre eux par des motifs réguliers grâce à des atomes d'oxygène mis en commun, comme le montre la figure (II.8.b). Les zéolites ont généralement des structures ioniques en raison de la présence d'aluminium car chaque atome d'aluminium introduit une charge négative qui doit être compensée par un cation dans un échange globale. Les zéolithes sont également des matériaux adsorbant microporeux. Le nom de zéolithe lui-même est dérivé de la capacité de conserver les molécules d'eau bien au-delà de la température d'ébullition.



**Figure II.8.a** Granulés de Zéolithe [86]



**Figure II.8.b** Structure moléculaire de zéolithe : (a) zéolithe A, (b) zéolithe X et Y, [81]

### I.5.3.3 Gels de silice

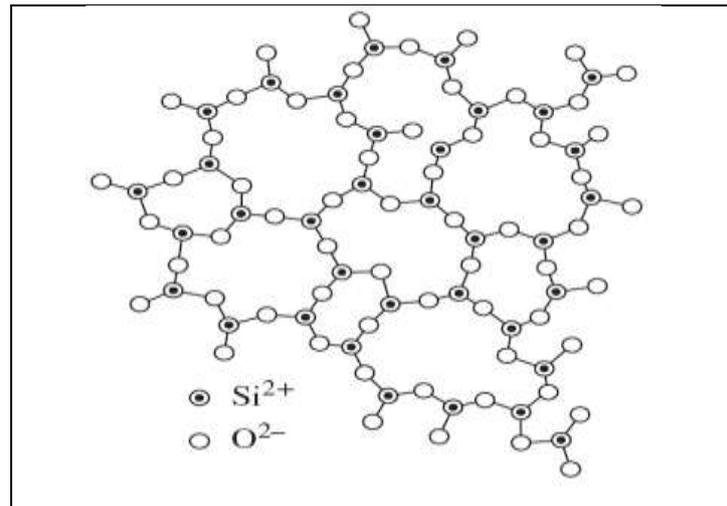
Les gels de silice ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ), comme le montre la figure (II.9.a), peuvent être obtenus par précipitation de silice en faisant réagir une solution de silicate de sodium avec un acide minéral (sulfurique ou chlorhydrique). Le gel obtenu est ensuite lavé, séché et activé.

La structure des pores est créée par l'agglomération des microparticules sensiblement sphérique de dimension à peu près uniforme et comprise entre 2 et 20 nm, comme le montre la figure (II.9.b). Les principales propriétés physiques de gels de silice sont données dans le tableau (II.2).

Les utilisations principales des gels de silice sont le séchage, la séparation des composés aromatiques, le traitement du gaz naturel, etc....



**Figure 1I.9.a** Gel de silice



**Figure II.9.b** Structure moléculaire de gel de silice [81]

#### II.5.3.4 Alumines activées

Les alumines activées sont obtenues par déshydratation thermique du tri-hydrate d'alumine. Comme les gels de silice, les alumines activées sont très hydrophiles et sont couramment utilisées pour le séchage.

#### II.5.3.5 Adsorbant à base de polymères

Les adsorbants à base de polymères organiques ont des applications pour l'élimination des composés organiques, la purification des eaux ou la fabrication de médicaments. Les polymères de base sont des polystyrènes, des esters polyacryliques ou des résines phénoliques.

#### II.5.3.6 Les adsorbats

L'adsorbat appelé aussi fluide frigorigène doit être chimiquement stable dans la plage de température de fonctionnement, non-toxique, non inflammable et non corrosif et avoir une faible chaleur spécifique. Les fluides possédant ces caractéristiques sont notamment: l'eau, l'ammoniac, le méthanol et l'éthanol. Le tableau (II.3) ci-dessous donne les propriétés physiques de quelques adsorbats (réfrigérants).

Fluide réfrigérant	Formule chimique	Température d'ébullition (°C)	Masse molaire	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)
Ammoniac	<b>NH<sub>3</sub></b>	<b>-34</b>	<b>17</b>	<b>681</b>	<b>1368</b>
Eau	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>100</b>	<b>18</b>	<b>958</b>	<b>2258</b>
Méthanol	<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	<b>65</b>	<b>32</b>	<b>791</b>	<b>1102</b>
Ethanol	<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH</b>	<b>79</b>	<b>46</b>	<b>789</b>	<b>842</b>

**Tableau II.3.** Propriétés physiques des réfrigérants [81]

#### II.5.4 Critères de sélection de l'adsorbant / adsorbat

Le couple est composé d'un adsorbant (solide) et d'un adsorbat (fluide frigorigène). Pour un cycle de réfrigération intermittent à adsorption solide, le choix du couple adsorbant-adsorbat est très important.

Les critères de choix varient suivant l'utilisation envisagée: congélation, réfrigération, conservation, climatisation, etc.... Différents types de couples adsorbant - adsorbat ont fait l'objet d'études, comme le couple zéolithe - eau et le couple gel de silice - eau. Ces deux couples sont utilisés pour la production du froid. Le couple charbon actif - méthanol et le couple charbon actif - ammoniac sont utilisés pour la production de la glace.

Pour le bon fonctionnement d'un système de réfrigération par adsorption, une sélection rigoureuse du couple de fonctionnement est essentielle car l'efficacité de la machine dépend de certaines caractéristiques physiques et chimiques, telles les conditions thermodynamiques (température, pression, etc...), la complexité dans la manipulation, les soucis environnementaux, etc....

Pour un système de réfrigération par adsorption, l'adsorbant doit présenter une grande capacité d'adsorption à des températures et pressions ambiantes faibles, mais une faible capacité d'adsorption à des températures et des pressions élevées. Ainsi, l'adsorbant est d'abord caractérisé par des propriétés de surface telle que la surface et la polarité. Une grande surface spécifique est préférable pour fournir une grande capacité d'adsorption. Une augmentation de la surface interne dans un volume limité donne inévitablement lieu à un grand nombre de pores de petites tailles entre les surfaces d'adsorption. La taille des micropores détermine l'efficacité de la capacité d'adsorption, donc la distribution des micropores est une propriété importante pour la caractérisation de l'adsorption des adsorbants.

Le choix de l'adsorbat dépend essentiellement des critères suivants:

- Une forte chaleur latente par unité de volume;
- De dimensions moléculaires qui devraient être suffisamment petites pour faciliter l'adsorption;
- Une conductivité thermique élevée;
- Une bonne stabilité thermique;

D'autre part le choix de l'adsorbant dépend principalement des facteurs suivants:

- Une capacité d'adsorption et de désorption, pour atteindre un effet de refroidissement haut;
- Une bonne conductivité thermique, afin de raccourcir le temps de cycle;
- Une faible chaleur spécifique;
- Une compatibilité chimique avec le fluide frigorigène choisi;
- Un faible coût et être largement disponible.

## II.6. Cycle frigorifique à adsorption

La machine frigorifique fonctionne selon un cycle thermique à adsorption basé sur le principe de la réversibilité de l'adsorption physique; fixation de la vapeur du fluide frigorigène "adsorbat" sur l'adsorbant lorsqu'il est refroidi et libération de celle-ci lorsqu'il est chauffé.

Ce cycle dit idéal, comme le montre la figure (II.10), représente l'évolution de l'état du mélange adsorbant / adsorbat contenu dans le générateur (adsorbeur / désorbeur). Il comprend quatre phases principales régissant le fonctionnement du système : échauffement de l'adsorbant (AB), désorption (BC), refroidissement de l'adsorbant (CD) et adsorption (DA). Le cycle à adsorption est représenté généralement dans un diagramme de Clausius - Clapeyron ( $\ln(P)$ ,  $-1/T$ ).

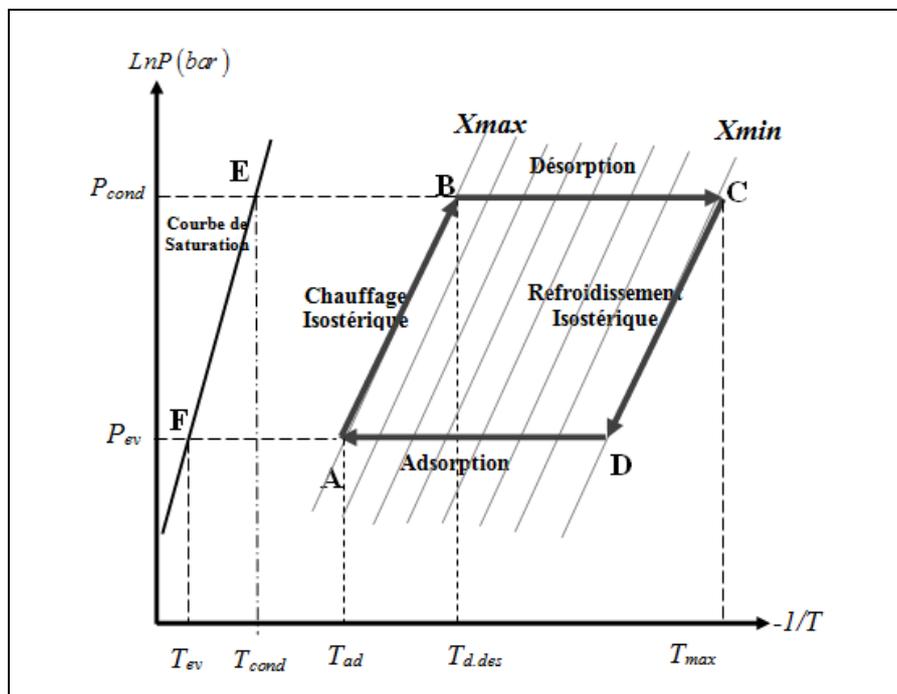


Figure II.10. Cycle à adsorption dans un diagramme de Clausius-Clapeyron ( $\ln(P)$ ,  $-1/T$ ).

Le cycle thermodynamique à adsorption est totalement défini par les différentes températures de fonctionnement :

- $T_{ad}$ : Température d'adsorption; température minimale atteinte par le mélange adsorbant / adsorbant
- $T_{d,des}$ : Température de début de désorption de l'adsorbant
- $T_{max}$ : Température de régénération; température maximale atteinte par le mélange adsorbant / adsorbant
- $T_{cond}$ : Température de condensation
- $T_{ev}$ : Température d'évaporation

### II.6.1 Chauffage isostérique

Cette phase est dite phase de chauffage isostérique (AB), comme le montre la figure (II.11). Au début du cycle (point A), le mélange adsorbant / adsorbant est à sa température minimale  $T_a$  (température ambiante ou température d'adsorption) et la pression du système est la même que la pression de saturation de l'adsorbant à la température de l'évaporateur  $T_{ev}$  (pression d'évaporation  $P_{ev} = P_{sat}(T_{ev})$ ). A cette phase, le générateur est relié à la source chaude, et est isolé du condenseur / évaporateur par la fermeture d'une vanne.

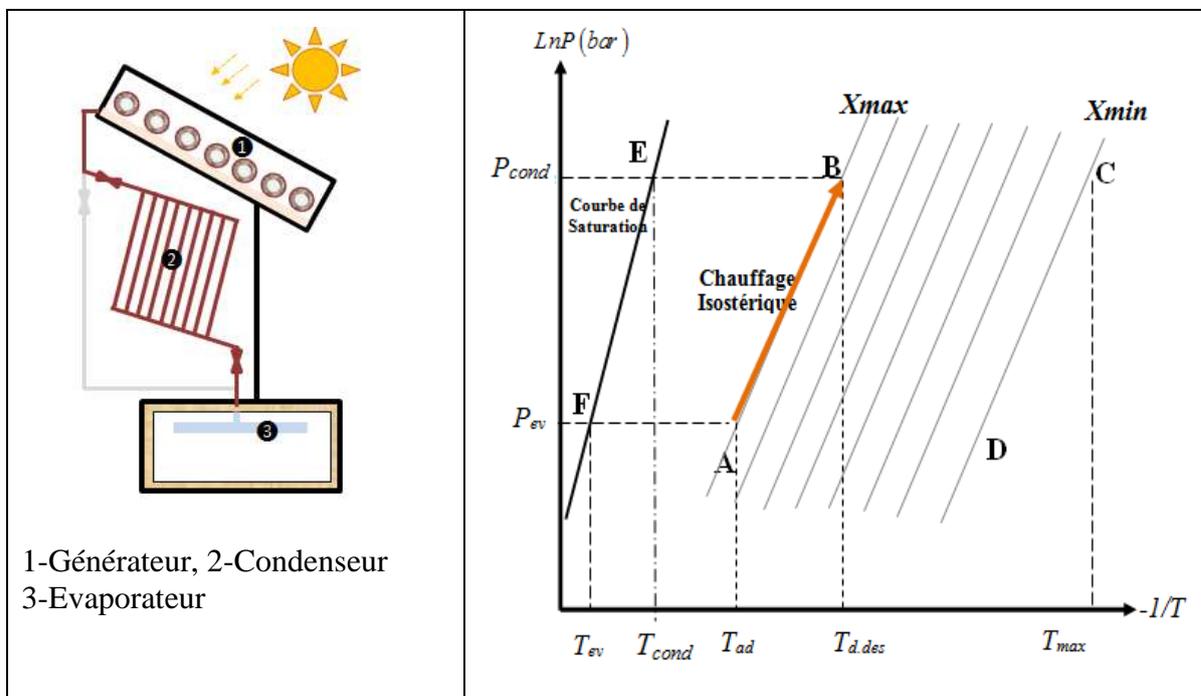


Figure II.11. Phase de chauffage isostérique

La puissance rayonnée par le soleil chauffe le générateur adsorbant, ce qui provoque une élévation de la température et de la pression du système de manière isostérique le long de  $X_{max}$ , comme le montre la figure (II.11). Cette phase de pressurisation s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur  $P_{cond}$  (point B). La température atteinte est dite température de début de désorption  $T_{d.des}$ .

### II.6.2 Désorption et condensation

Une fois que la pression du mélange dans le générateur atteint la pression de saturation correspondante à la température ( $T_{cond}$ ) du condenseur, ce dernier est mis en communication avec l'adsorbant (point B), comme le montre la figure (II.12). Durant cette phase l'adsorbant est désorbé du fluide qu'il contient. Aussi pendant cette dernière, l'énergie solaire continue à augmenter la température de l'adsorbant, mais la pression du système suit l'isobare imposée par le condenseur.

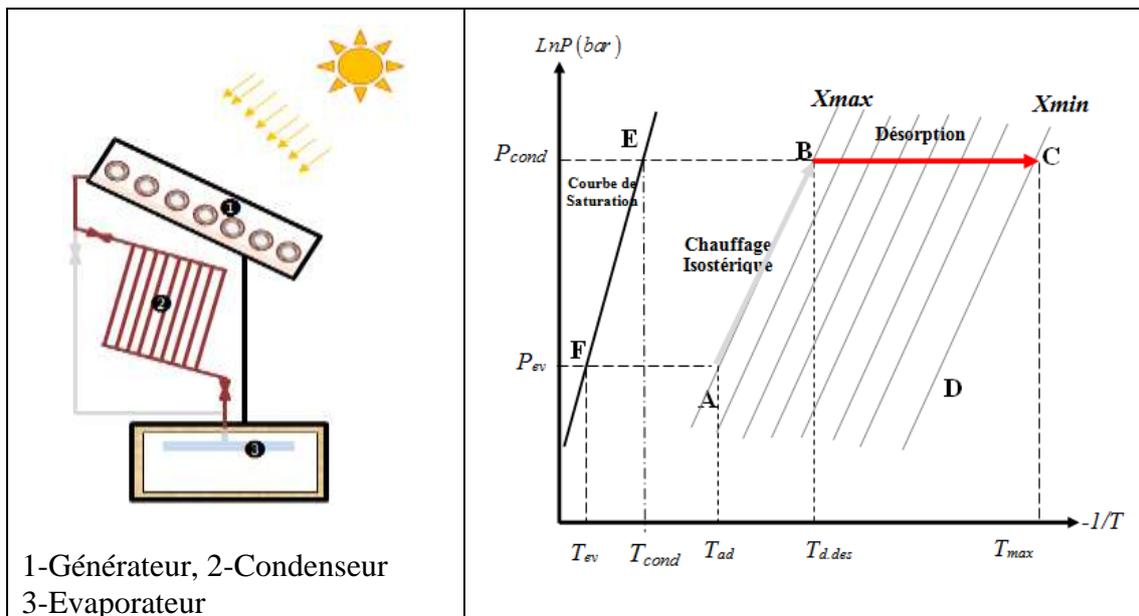


Figure II.12. Phase de désorption et de condensation

La désorption s'achève au point (C) quand l'adsorbant atteint la température maximale  $T_g$  (température de régénération) fixée pour le cycle correspondant. Le condensat est évacué vers l'évaporateur par simple gravité lors de sa formation. Cette phase est généralement appelée régénération car c'est celle qui rend l'adsorbant propice à une nouvelle phase de production frigorifique. Elle est équivalente à "la condensation" dans le cycle de compression classique.

### II.6.3. Refroidissement isostérique

La phase de refroidissement isostérique (CD) se fait en isolant le générateur par la fermeture de la vanne qui est entre le condenseur et le générateur. Le refroidissement de l'adsorbeur commence au point (C), où la température et la pression diminuent jusqu'à ce que la pression devienne égale à celle qui règne dans l'évaporateur.

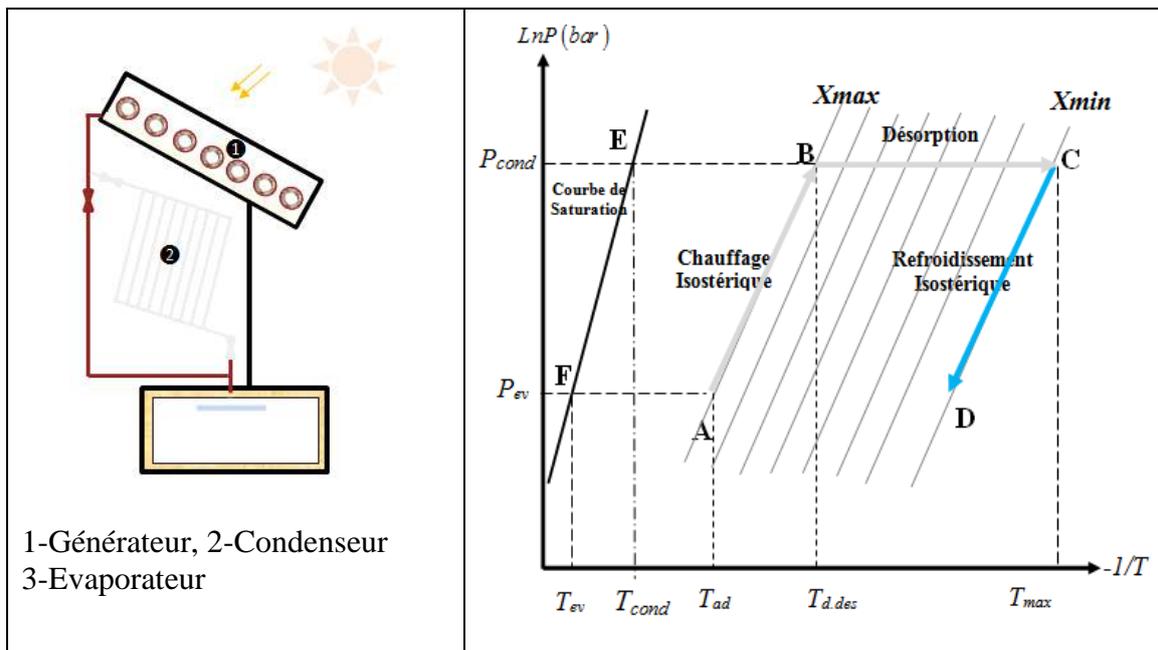


Figure II.13. Phase de refroidissement isostérique

La température atteinte est dite température seuil d'adsorption (point D). La concentration du fluide adsorbé reste constante dans cette phase et est égale à  $X_{min}$ , comme le montre la figure (II.13).

### II.6.4 Adsorption et évaporation

Cette phase est la phase motrice du cycle de la figure (II.14), pendant laquelle le froid est produit. Au point (D), commence l'évaporation du fluide frigorigène en produisant le froid comme dans un cycle à compression classique. On ouvre la vanne qui relie le générateur et l'évaporateur, ce qui permet l'adsorbant d'adsorber la vapeur de fluide frigorigène. Cette dernière s'adsorbe dans l'adsorbeur, jusqu'à ce que la température  $T_{ad}$  d'adsorption devienne minimale.

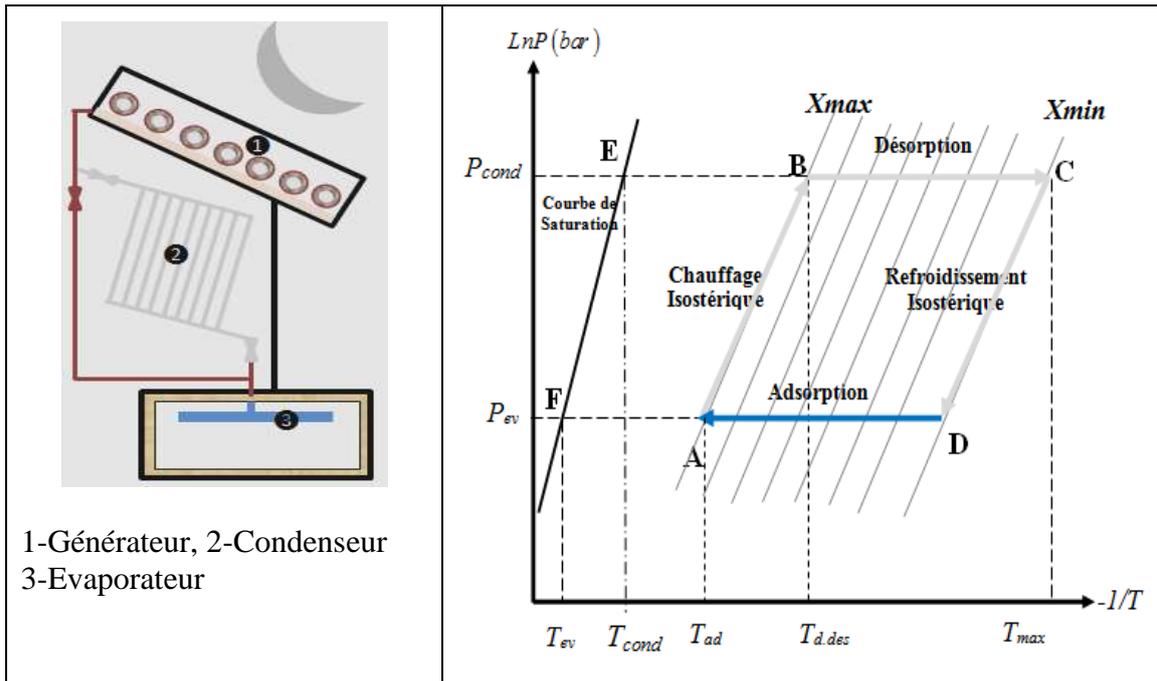


Figure II.14. Phase d'adsorption - évaporation

Durant cette phase, le système suit l'isobare imposée par l'évaporateur, ce qui correspond à la pression de saturation du fluide frigorigène à la température d'évaporation. A ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

## **Chapitre -III :**

---

# **Description de l'installation frigorifique solaire**

---

### **III.1. Introduction**

La machine frigorifique fonctionne selon un cycle thermique à adsorption basé sur le principe de la réversibilité de l'adsorption physique; fixation de la vapeur du fluide frigorigène "adsorbat" sur l'adsorbant solide lorsqu'il est refroidi et libération de celle-ci lorsqu'il est chauffé.

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux éléments utilisés dans les installations frigorifiques solaires à adsorption tel que le générateur qui porte les matériaux adsorbants, le condenseur et l'évaporateur. Nous accordons une attention particulière à la fabrication et le montage de notre prototype de réfrigération solaire à adsorption fonctionne avec le couple silicagel-eau.

### **III.2. Eléments de la machine frigorifique**

Un système à adsorption solaire utilisé pour produire du froid, comme le montre la figure (III.1), comprend essentiellement, un capteur solaire à adsorbant, un condenseur et un évaporateur [87], [88].

#### **III.2.1 Capteur solaire**

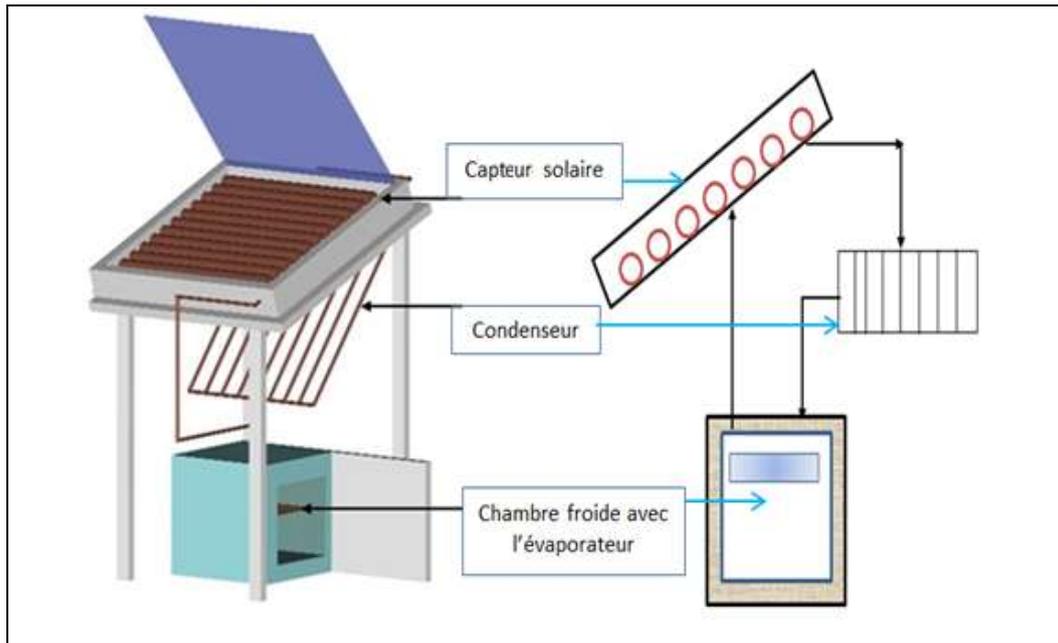
Le capteur solaire ou générateur solaire est un élément essentiel dans une machine frigorifique à adsorption. Il contient le matériau solide ou adsorbant. Le capteur solaire est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique. La chaleur reçue de cette conversion est utilisée directement pour chauffer l'adsorbant.

#### **III.2.2 Condenseur**

Les condenseurs des machines frigorifiques, sont des échangeurs thermiques, entre le fluide frigorigène et milieu de condensation (air ou eau). Lors de son passage dans le condenseur, le fluide frigorigène passe de l'état vapeur à l'état liquide.

#### **III.2.3 Evaporateur**

L'évaporateur, comme le condenseur, est un échangeur thermique dont le rôle consiste à absorber le flux thermique provenant du milieu à refroidir.



**Figure III.1.** Schématisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption

### III.3 Choix et dimensionnement des éléments du prototype

La machine frigorifique solaire à adsorption est à cycle intermittent. La simplicité de sa conception ainsi que sa totale autonomie énergétique pendant la phase de production de froid, font d'elle une machine intéressante pour différentes applications telle que la climatisation, le stockage des denrées alimentaires et des produits pharmaceutiques, [89] et [90].

Le choix des éléments d'une machine frigorifique permet de connaître la quantité d'énergie à enlever pour refroidir un volume. La justesse de ce calcul est nécessaire non seulement pour le coût de l'installation, mais aussi pour son exploitation. Les éléments entrant en compte dans ce calcul sont nombreux. On doit connaître, le volume de la chambre à refroidir, sa température, le fluide frigorigène utilisé, le stockage ou non, le type d'isolation de la chambre froide.

Le fonctionnement de la machine frigorifique solaire à adsorption dépend aussi des paramètres suivants :

- L'éclairement énergétique dû au rayonnement global, la position du soleil et la durée d'insolation
- La température extérieure
- La vitesse du vent

- L'inclinaison et l'orientation du capteur
- Les dimensions du capteur : épaisseur, longueur, la largeur, et la surface réceptrice
- Les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité) de la surface absorbante et de la couverture

### III.3.1 Chambre frigorifique

La chambre froide choisie pour notre installation frigorifique a un volume de 15 litres. Elle est représentée sur la figure (III.2). Elle est dotée d'un évaporateur qui permet son refroidissement pendant la phase de production de froid.



**Figure III.2.** Photo de la chambre froide avec ses dimensions

Le volume de la chambre est isolé par du polyuréthane à basse conductivité thermique pour minimiser les pertes calorifiques entre la chambre froide et l'ambiance. Les surfaces extérieures de la chambre froide sont couvertes par une tôle laquée afin d'avoir une enveloppe solide et même temps pour réduire les pertes thermiques. Les dimensions de la chambre froide sont listées dans le tableau (III.1).

Dimension	Valeur (cm)
L1	60
L2	70
L3	60
L4	55
L5	70
L6	30
L7	25
L8	25
e1	15
e2	15

**Tableau III.1.** Dimensions de la chambre frigorifique

La quantité de froide à produire ( $Q_{\text{frig}}$ ) ou de chaleur absorbée par l'évaporateur dépend des conditions particulières de l'installation. Notre choix s'est fixé pour un volume de chambre froide de 15 litres. Les parois sont composées essentiellement d'une couche de polyuréthane. Les conditions extérieures et intérieures, de la chambre froide proposée, sont listées dans le tableau (III.2).

Données	Valeurs	Références
Dimensions intérieures	20 x 25 x 30 cm	-
Epaisseur de l'isolant (polyuréthane)	15 cm	-
Température intérieure	10 °C	-
Température extérieure	35 °C	-
Propriétés de l'air (T=10°C)	$\beta = \frac{1}{273.15+10} \quad (\text{K}^{-1})$ $\lambda = 0.02494 \quad (\text{W/m.K})$ $\text{Pr} = 0.7163$ $\nu = 1.442 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m}^2/\text{s})$ $\rho = 1.230 \quad (\text{kg/m}^3)$	[91]
Propriétés de l'air extérieur (T=35°C)	$\beta = \frac{1}{273.15+35} \quad (\text{K}^{-1})$ $\lambda = 0.0264 \quad (\text{W/m.K})$ $\text{Pr} = 0.713$ $\nu = 1.620 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m}^2/\text{s})$ $\rho = 1.130 \quad (\text{kg/m}^3)$	[91]

**Tableau III.2.** Données de fonctionnement de la chambre froide

**A. Charge obtenue par transmission par les parois de la chambre frigorifique**

$Q_{Trans} = \sum K.S.\Delta T$	(II.1)
---------------------------------	--------

Où :

Le coefficient d'échange global ( $K$ ) d'une paroi est donné par la relation:

$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{ex}}}$	(II.2)
---	--------

Avec :

$h_{in}$ : Coefficient d'échange par convection du côté intérieur de la chambre (W/m<sup>2</sup>.K)

$e_{is}$ : Epaisseur de l'isolant thermique (m)

$\lambda_{is}$ : Conductivité thermique de l'isolant (W/m. K)

$h_{ex}$ : Coefficient d'échange par convection du côté extérieur de la chambre (W/m<sup>2</sup>.K)

$\Delta T$ : Ecart de température (K)

Les parois sont composées essentiellement d'une couche de polyuréthane de conductivité égal à 0.028 W/m. K.

Les coefficients de convection naturelle ( $h$ ), intérieure et extérieure de la chambre froide sont déterminés à partir du calcul des nombres de Prandtl, Grashoff et Nusselt [92].

L'expression du nombre Nusselt est donnée par l'équation suivante [92] :

$Nu = 0.68 + 0.67Ra^{1/4} \left\{ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right\}^{-4/9}$	(II.3)
---	--------

**B. Charge obtenue pour le refroidissement de la quantité d'air intérieur**

$Q_{air} = m_{air} \cdot C_{p,air} \cdot \Delta T$	(II.4)
--	--------

$m_{air}$ : masse d'air (kg)

$C_{p,air}$ : chaleur spécifique de l'air (kJ/kg.K)

**C. Charge obtenue par refroidissement de l'eau**

Cette charge correspond à un refroidissement de (0.5 kg) d'eau à 0 °C.

$Q_{eau} = m_{eau} \cdot C_{p,eau} \cdot \Delta T$	(II.5)
--	--------

$m_{air}$  : masse de l'eau (kg)

$C_{p,air}$  : Chaleur spécifique de l'eau (kJ/kg.K)

**D. Charge obtenue par refroidissement de la masse de cuivre:**

$Q_{met} = m_{cui} \cdot C_{p,cui} \cdot \Delta T$	(II.6)
--	--------

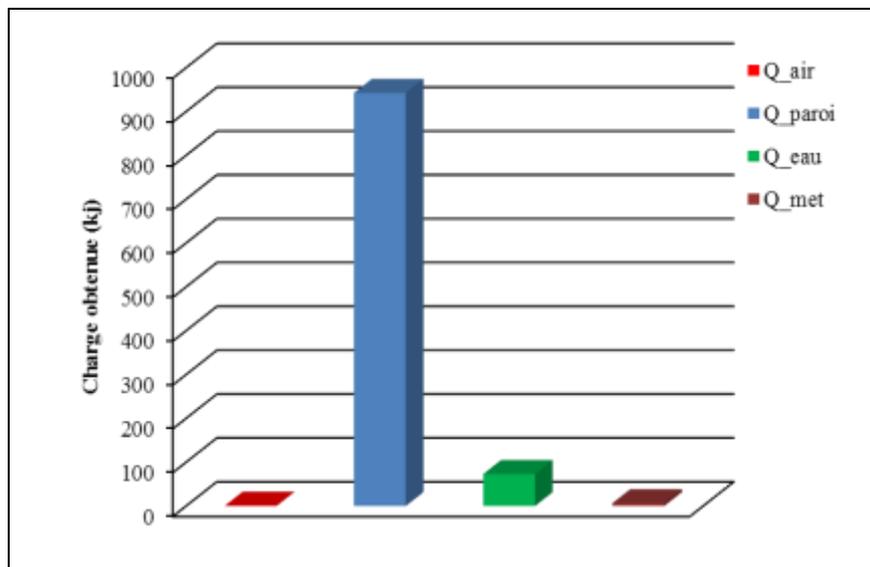
$m_{cui}$  : masse de la partie métallique en cuivre (kg)

$C_{p,cui}$  : Chaleur spécifique du cuivre (kJ/kg.K)

La quantité de froid ( $Q_{frig}$ ) totale est donnée par :

$Q_{frig} = Q_{Trans} + Q_{air} + Q_{eau} + Q_{met}$	(II.7)
--	--------

La figure (III.3) représente la charge frigorifique totale de notre système de réfrigération solaire à adsorption. Ce système destiné pour la production du froid avec l'utilisation de couple gel de silice – eau. La charge frigorifique obtenue est basé principalement sur la charge à travers les parois, la masse d'air, la masse d'eau et la masse de la partie métallique de l'évaporateur.



**Figure III.3.** Charges frigorifiques totales

### III.3.2 Couple de fonctionnement

Le choix du couple de fonctionnement est très important. Il se fait en fonction des niveaux de températures d'utilisation frigorifique envisagée. Dans cette étude, et pour les applications de l'énergie solaire le couple utilisé est le silicagel - eau. Ce dernier est choisi en raison de sa faible température de régénération.

L'eau est un fluide frigorigène parfaitement sûr pour l'homme, disponible, possède de bonnes propriétés thermiques mais sa pression de fonctionnement est faible et inférieure à la pression atmosphérique (20 - 80 mbar) [93], ce qui nécessite des équipements spéciaux pour éviter les entrées d'air extérieur. Sa gamme de température de production de froid est réduite (0 -10 °C), et ne peut donc pas être utilisée dans des applications de congélation, mais reste bien adaptée pour la climatisation et la production du froid. Plus généralement, l'eau est un fluide "idéal" d'un point de vue de sa toxicité et de son empreinte environnementale.

De plus, l'eau présente l'avantage d'avoir une plus grande chaleur latente de vaporisation que d'autres fluides frigorigènes classiques est de 2500 (kJ/kg). Les adsorbants sont souvent choisis en fonction de leurs capacités d'adsorption et leurs fortes conductivités thermiques et physico-chimique compatible avec le réfrigérant.

D'une manière générale, le fonctionnement d'une telle machine à adsorption fonctionne de la manière suivante : l'eau (réfrigérant ou adsorbat) s'évapore du gel de silice sous l'effet de l'apport de chaleur via le capteur solaire. C'est donc pendant la journée que l'échauffement du capteur solaire permet la désorption de l'eau. Durant cette période, nous observons une augmentation de la pression ainsi que la condensation de la vapeur d'eau. A l'inverse, durant la nuit, la diminution de température au niveau de l'absorbeur engendre une diminution de la pression et provoque donc la ré-adsorption de l'eau qui avait été condensée durant la journée. C'est alors durant cette phase que le froid est produit.

La masse d'eau correspondant à la production du froid ( $Q_{frig}$ ) pour une durée de temps  $t_f$  est calculé par la formule suivante :

$$\dot{Q}_{frig} = \dot{m}_{eau} \cdot (L_{ev,(Tev,0^{\circ}C)}) \quad (II.8)$$

Avec :

$$m_{eau} = \dot{m}_{eau} \cdot t_{ads} \quad (II.9)$$

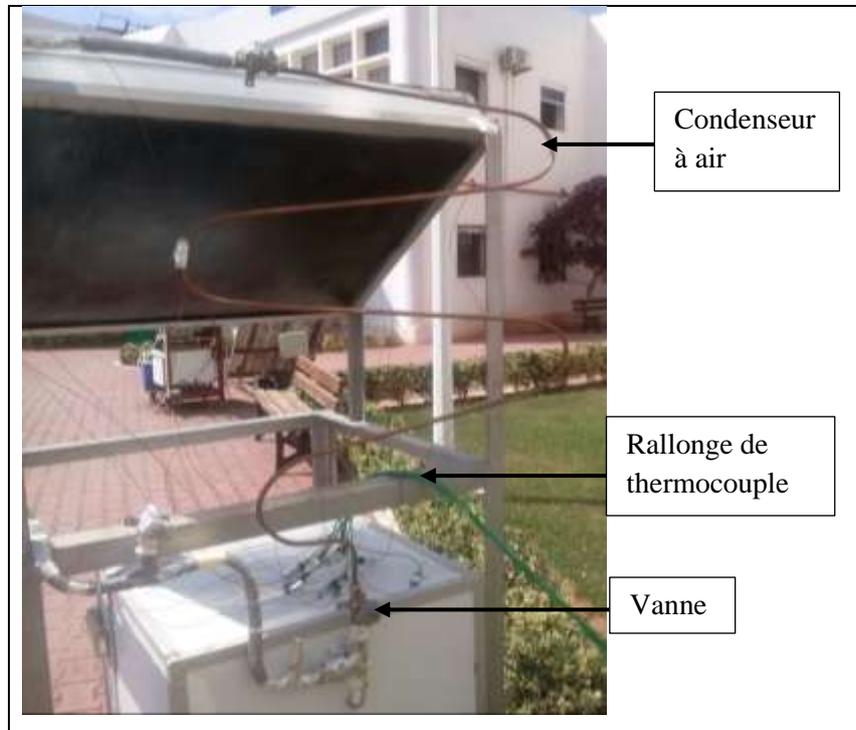
Pour une période d'adsorption  $t_{ads}$ , la masse d'eau est d'environ 0.43 kg.

Pour une capacité d'adsorption maximale de  $0.11 \text{ (kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{silicagel}})$ , [94], [95] la masse de silicagel utilisé est d'environ 4.5 kg.

### III.3.3 Construction du condenseur et de l'évaporateur

Le condenseur, défini comme un échangeur de chaleur, est constitué de tubes en cuivre d'épaisseur 1mm et de diamètre intérieur et extérieur respectivement de 0.007 m et 0.009 m. Dans le condenseur, la vapeur d'eau désorbée du matériau adsorbant (gel de silice) et condensée est refroidie par convection naturelle dans l'air ambiant comme le montre la figure (III.4).

Le condenseur est positionné dans l'installation frigorifique solaire de manière à ce que le condensat s'écoule, facilement sous l'effet de la gravité, vers l'évaporateur.



**Figure III.4** Photo du condenseur à air

La détermination de la surface de condensation est importante dans notre installation. Les paramètres entrant en compte dans le calcul sont nombreux, il faudra connaître, la nature d'échange (convection naturelle ou turbulente), la température de désorption, la température de condensation. Dans notre installation frigorifique la surface d'échange d'un condenseur est calculée comme suit:

$$S_c = \frac{\dot{Q}}{h_c \Delta T} \quad (\text{II.10})$$

$\dot{Q}$ : Le flux de chaleur du condenseur en (W), est égale la somme de la quantité de chaleur pour condenser la vapeur et la quantité de chaleur pour refroidir le liquide.

$\dot{Q} = \dot{m}_{eau} \cdot [L_{eau,Tc} + C_{p,eau} \Delta T]$	(II.11)
---	---------

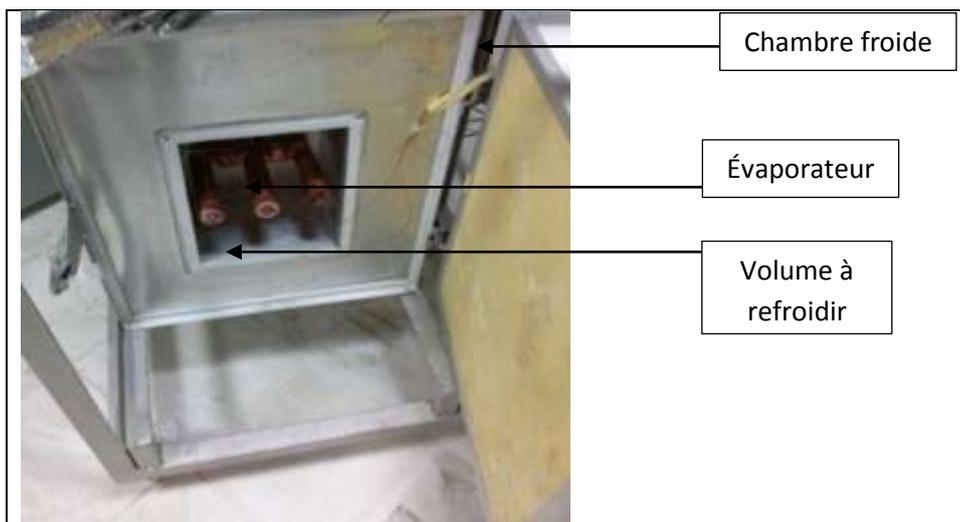
$h_c$ : Coefficient d'échange de chaleur par convection en (W/m<sup>2</sup>.K), est calculé par :

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}$$

Le nombre de Nusselt ( $Nu$ ) pour la convection laminaire autour d'un cylindre horizontal est donné par la formule suivante [96] :

$Nu = 0.36 + 0.518 \left\{ \frac{Ra}{\left[ 1 + \left[ \frac{0.559}{Pr} \right]^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{16}{9}}} \right\}^{\frac{1}{4}}$	(II.12)
--	---------

Un autre élément important de la machine expérimentale est l'évaporateur. Ce dernier est un échangeur de chaleur, qui contient un volume de 0.8 litre maximum. Il est constitué de tubes en cuivre d'épaisseur 1mm et de diamètre extérieur et intérieur respectivement de 0.04 m et 0.038 m. L'élément de l'évaporateur est placé dans une chambre froide qui est isolée avec un matériau isolant de polyuréthane de 0.15 m d'épaisseur. Une photographie de la chambre froide avec l'évaporateur est présentée sur la figure (III.4).



**Figure III.5.** Photo de la chambre froide avec l'évaporateur

### III.3.4 Générateur solaire

Le générateur solaire à adsorbant est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique, la chaleur reçue de cette conversion est utilisée directement pour le chauffage de l'adsorbant, il est formé principalement des éléments suivants ; une couverture transparente, une surface absorbante, un isolant thermique.

Le capteur solaire est formé d'une surface avant transparente et une surface arrière opaque. La surface totale de captation est déterminée à partir de la formule suivante :

$S_{captation} = \frac{Q_{frig}}{I_r \cdot COP_s}$	(II.13)
--	---------

Pour un coefficient de performance solaire de (0.1) et pour une intensité solaire globale d'environ de 17 (MJ), la surface de captation du capteur est d'environ de 0.6 (m<sup>2</sup>).

La surface transparente avant de capteur permet d'accroître sensiblement le rendement du convertisseur par effet de serre. L'intérêt d'une couverture transparente pour le rayonnement solaire est que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le polycarbonate, le poly-méthacrylate.

La surface absorbante converti le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde en chaleur puis elle transporte cette chaleur à la matière adsorbante.

Le collecteur adsorbant est de forme soit tubulaire soit à ailettes. La surface absorbante est couramment en cuivre, en acier inoxydable ou bien en aluminium.

Le tableau (III.3), donne les principales caractéristiques thermo-physiques des matériaux. La plaque métallique est revêtue par une couche, appelée couche sélective. La sélectivité est le rapport du facteur d'absorption solaire ( $\alpha$ ) sur le facteur d'émission infrarouge ( $\epsilon$ ).

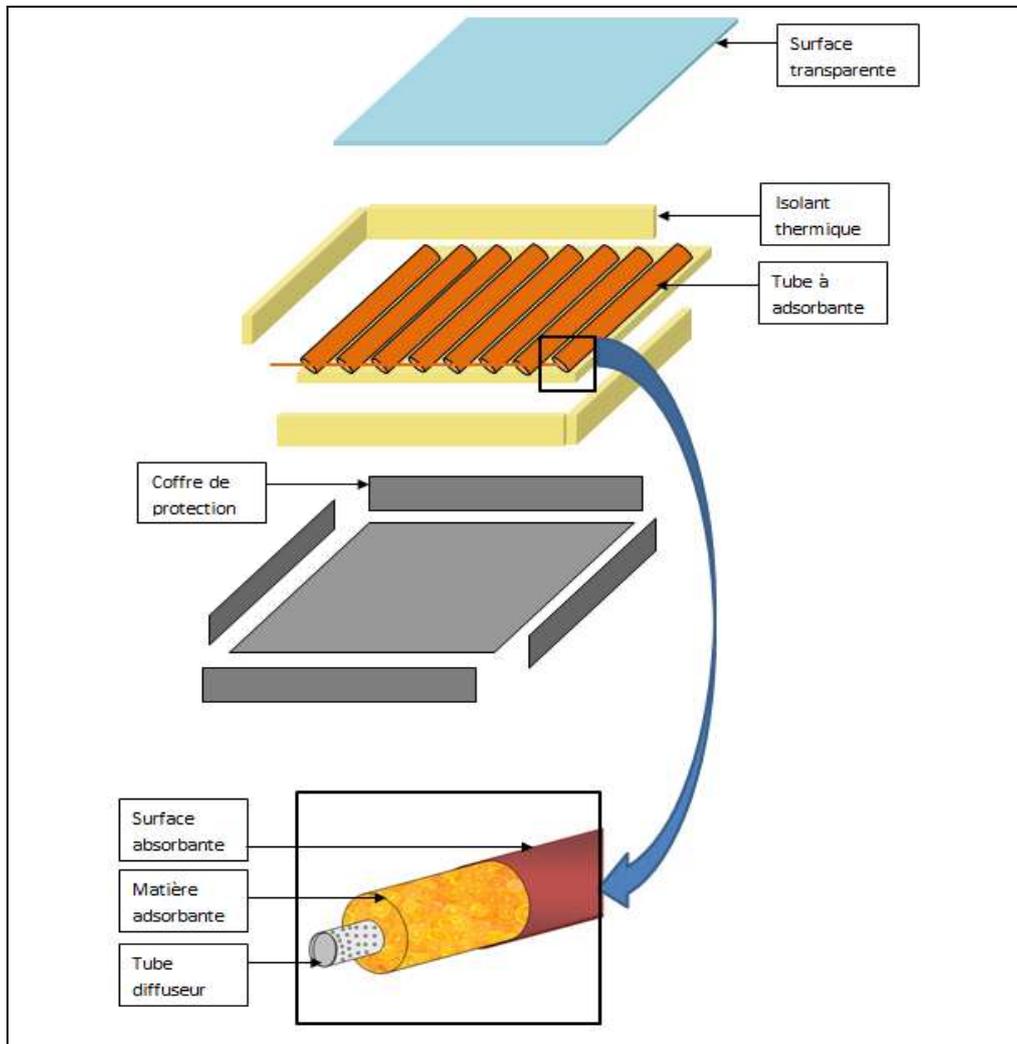
Le capteur à adsorbant est l'élément essentiel de la machine frigorifique solaire à adsorption réalisée au laboratoire de froid à l'UDES.

En ce qui concerne la capture de rayonnement solaire, deux types de géométrie sont utilisées : le sorbant solide est mis soit dans des tubes ou des caissons métalliques.

Plaque métallique	Conductivité thermique ( $\lambda$ )	Chaleur massique ( $c_p$ )	Masse volumique ( $\rho$ )
Cuivre	398	386	8930
Aluminium	236	902	2710
Acier	49.8	465	7840

**Tableau III.3.** Propriétés thermo- physiques des surfaces absorbantes

Pour une meilleur d'isolation et meilleur protection mécanique du générateur un coffre contenant les éléments cites précédemment est prévu à cet effet. Un schéma représentant en détail notre collecteur à adsorbant est présenté sur la figure (III.6).

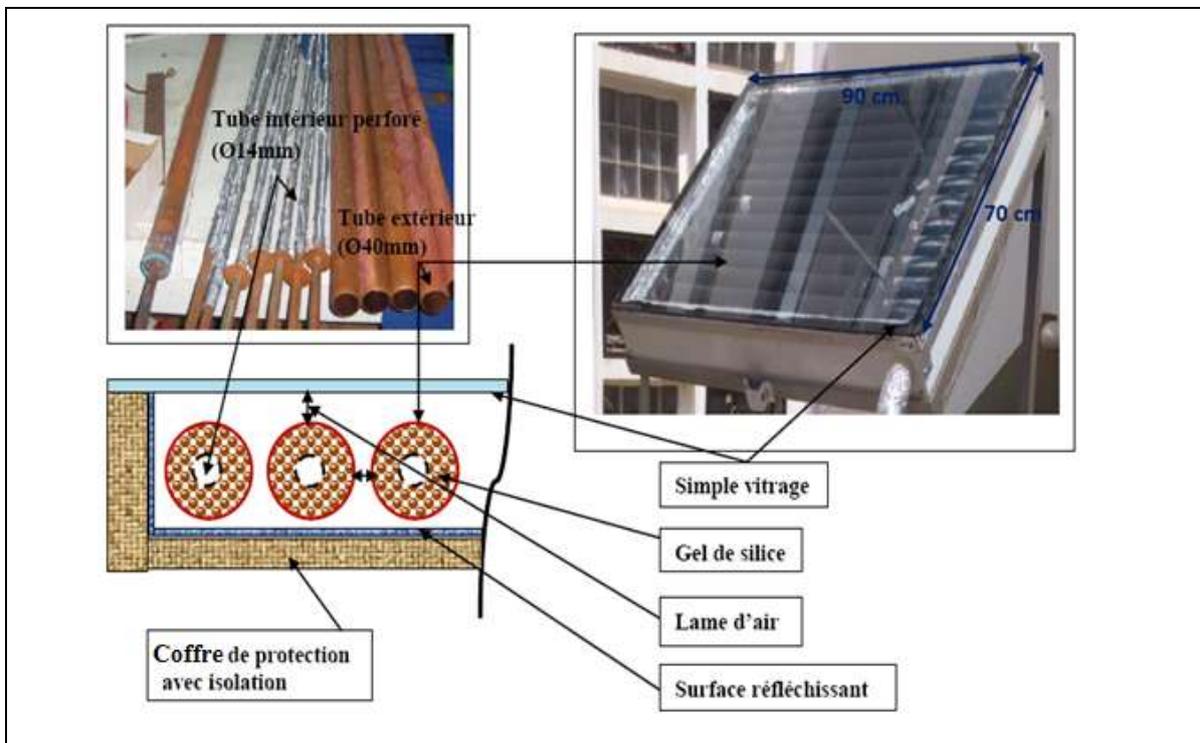


**Figure III.6.** Schéma représentatif du capteur solaire à tubes

### III.3.4.1 Collecteur tubulaire

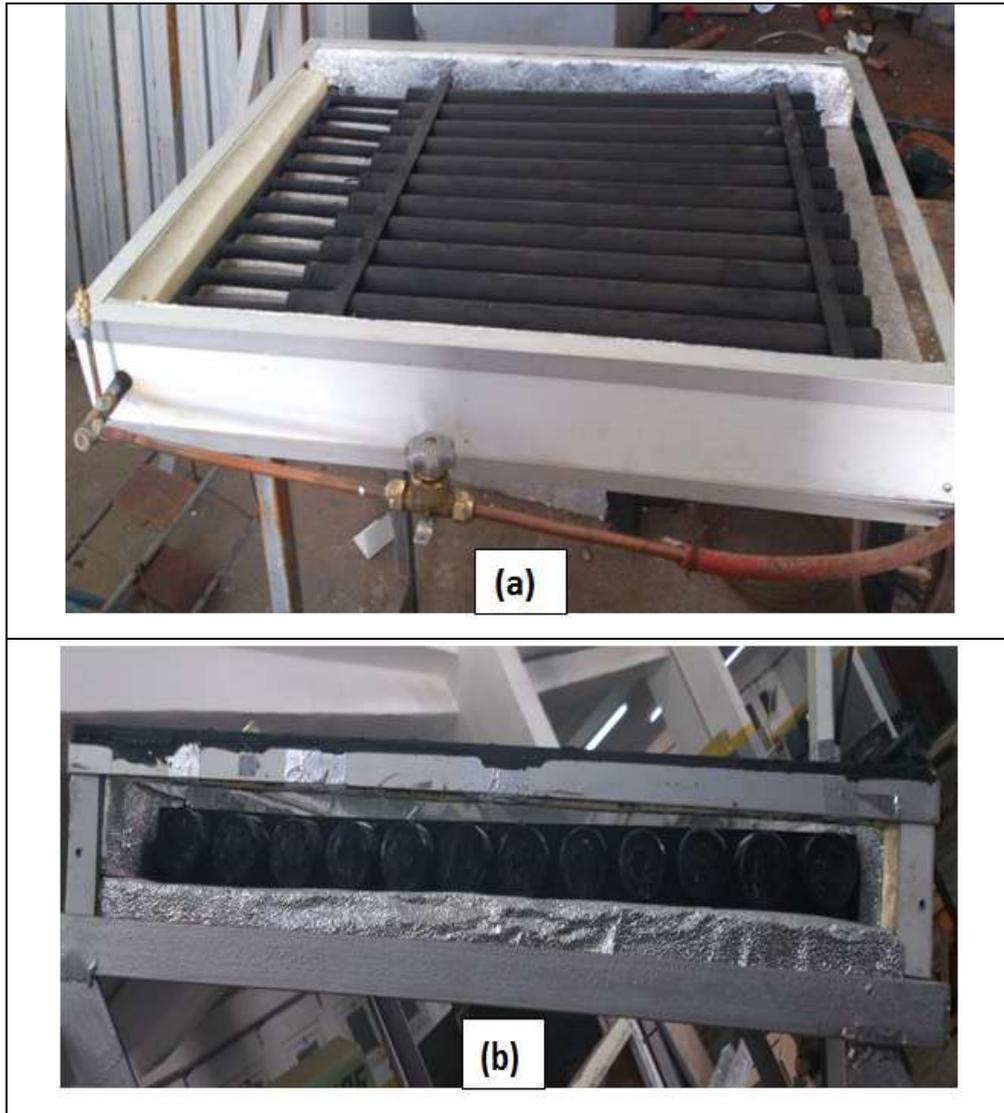
Les tubes d'adsorbants contiennent 4.5 kg de gel de silice, dans l'espace annulaire formé par les tubes coaxiaux, comme la montre la figure (III.7). Le tube externe en cuivre à un diamètre de 0.04 m, une épaisseur de 0.001 m et une longueur de 0,62 m. Le tube interne en cuivre à un diamètre de 0,014 m et épaisseur de 0,001 m et une longueur de 0,62 m. Les tubes internes en cuivre sont perforés, afin de faciliter l'écoulement de la vapeur d'eau vers le condenseur.

La surface intérieure, du capteur solaire qui est représenté sur la figure (III.7), est couverte par une surface réfléchissante en aluminium, afin d'augmenter l'apport de chaleur dans le lit d'adsorbant.



**Figure III.7.** Structure détaillée de notre générateur solaire à adsorbant

Les faces extérieures des tubes adsorbants sont recouvertes par une peinture noire mate pour absorber un maximum de rayonnement solaire, comme le montre la figure (II.8 a et b). Le capteur solaire est constitué des 12 tubes de cuivre réparties en parallèle et une surface transparente à simple vitrage.



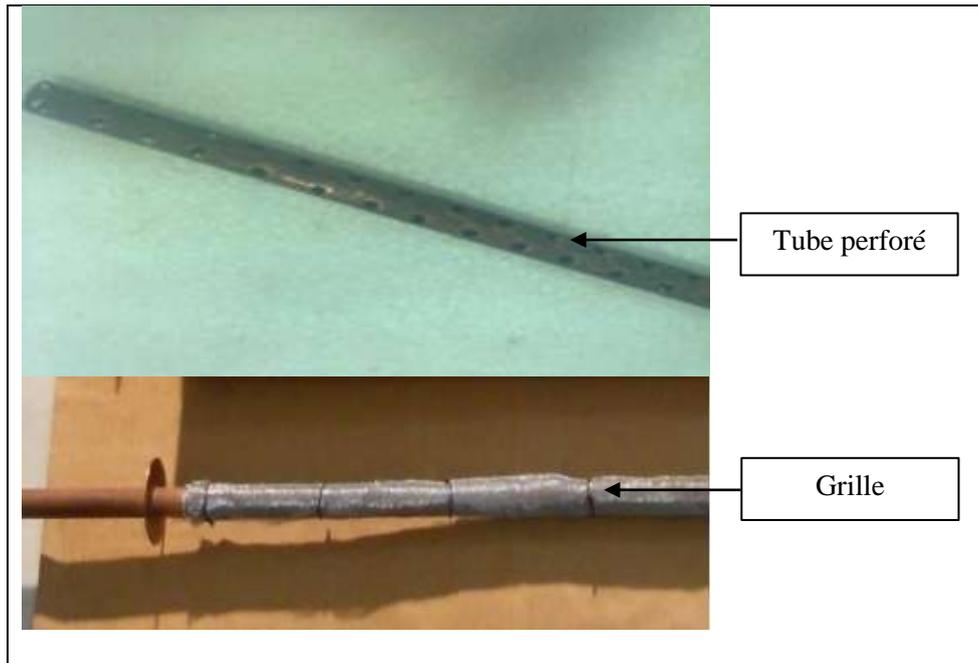
**Figure III.8.** Image du capteur solaire tubulaire ; (a): vue de face avant, (b): vue de côté

Au cours de la fabrication des différents éléments de la machine notamment le capteur, élément moteur de la machine, un soin particulier est observé pendant la soudure, car le réfrigérateur fonctionne à des pressions très inférieures à la pression atmosphérique.

La face arrière du capteur adsorbeur à une isolation thermique permanente. Afin de pouvoir refroidir rapidement les tubes lors de la phase de refroidissement des volets isolés sont pratiqués sur les côtes du capteur solaire.

#### III.3.4.2 Tube diffuseur de gaz

Dans le cas d'un capteur adsorbeur tubulaire, la répartition des molécules d'adsorbat à la surface de l'adsorbant est assurée par des diffuseurs sous forme de tube perforé, comme illustré sur la figure (III.9).



**Figure III.9.** Photographie de tube diffuseur de gaz

La soudure, des tubes de cuivre, est réalisée avec de l'argent dont la fluidité permet une bonne infiltration entre les surfaces.

Le choix du cuivre pour la fabrication des éléments du capteur, du condenseur et de l'évaporateur est dû non seulement au fait qu'il soit bon conducteur de la chaleur, mais aussi pour des raisons techniques liées aux contraintes d'une soudure étanche.

#### **III.4. Instrumentation de l'installation**

Les instruments de mesures utilisés, dotés d'une sortie analogique, sont branchés sur une centrale d'acquisition permettant la lecture et l'enregistrement des mesures. Les grandeurs à mesurer durant les jours de tests sont :

- L'ensoleillement ;
- La température de l'adsorbant ;
- La température de l'évaporateur ;
- La température du condenseur ;
- la température ambiante ;
- la pression dans le générateur.

### III.4.1 Mesure des radiances solaires

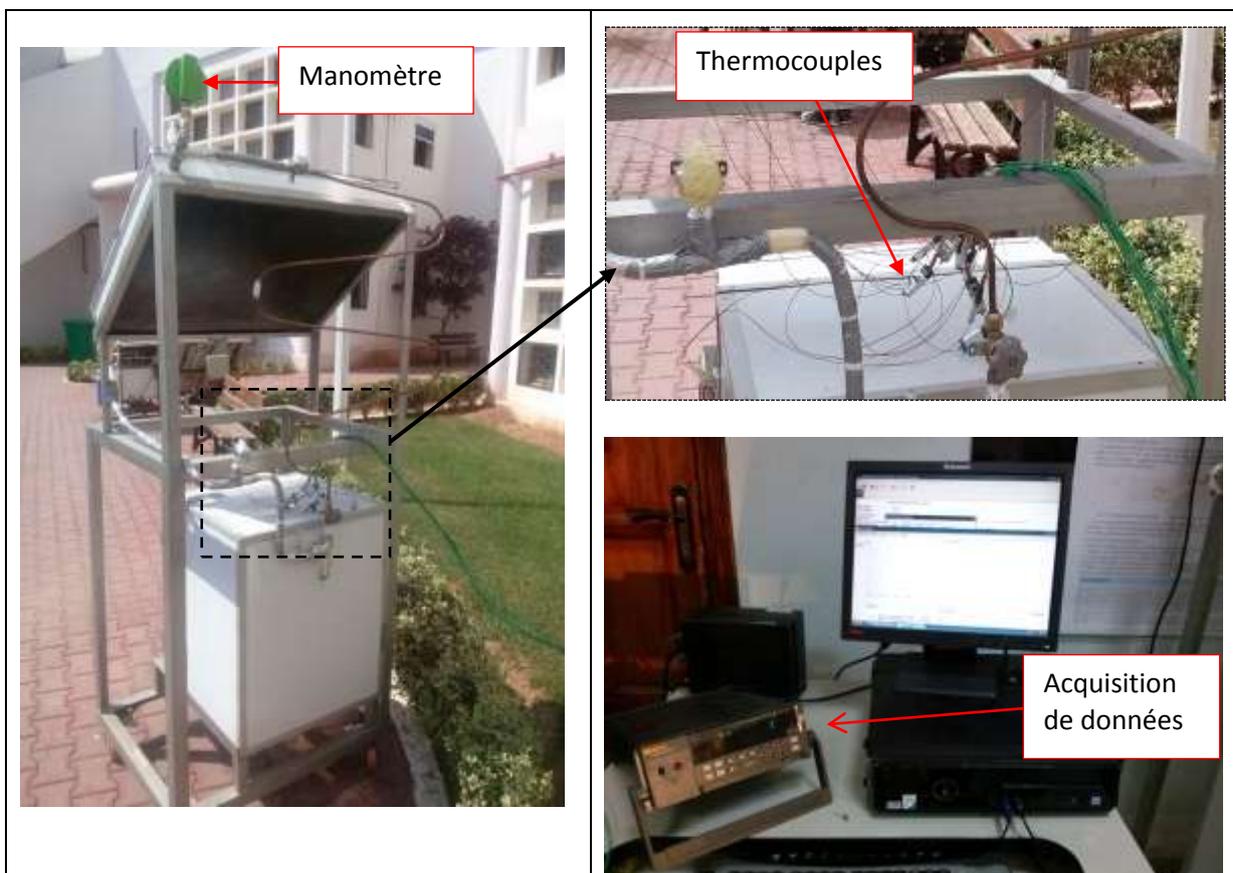
L'ensoleillement est mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type EKO MS-410. Ce dernier, incliné d'un angle égal à la latitude de Bou-Ismaïl de  $36^\circ$ , permet de mesurer le rayonnement solaire global reçu.

### III.4.2 Mesure de pression

Un capteur de pression relié au système permet de suivre l'évolution de la pression en fonction du temps. Un manomètre de type REFCO, de 0 à 1000 mbar est utilisé pour mesurer la pression dans le générateur (lit d'adsorbant) pendant la période de chauffage et de désorption. Le manomètre est placé à la sortie du générateur qui est connecté avec le condenseur, comme le montre la figure (III.10).

### III.4.3 Mesure des températures

L'installation de réfrigération solaire à adsorption est équipée d'un système d'acquisition de données destiné à mesurer les différentes températures à chaque minute, comme le montre la figure (III.10).



**Figure III.10.** Réfrigérateur solaire avec système d'acquisition de données

Ce système est équipé de six thermocouples placés respectivement dans le collecteur adsorbant (couvercle vitré, paroi tubulaire extérieure et silicagel), le condenseur, l'évaporateur et l'air ambiant. Le système d'acquisition de données est composé d'un ordinateur et d'un enregistreur de données (FLUKE) pour consigner les températures.

### III.5 Mise sous vide de l'installation

Ce type de système frigorifique à adsorption fonctionne à des pressions inférieures à la pression atmosphérique [83]. Avant de procéder à la mise en fonctionnement de ce système, nous avons vérifié l'étanchéité de chaque élément, comme illustré sur la figure (III.11).



**Figure III.11.** Vérification de l'étanchéité des éléments du système

Dans notre l'installation le nettoyage et la vérification de chaque éléments est faite séparément. Puis le prototype est monté en utilisant des vannes pour le raccordement de tous les éléments du système. Une fois l'installation monter on procède ensuite à sa mise sous un vide poussé pour faire baisser la pression et évacuer l'air introduit dans le système. A ce stade Notre machine est prête à l'expérimentation.

## **Chapitre-IV :**

---

# **Résultats expérimentaux**

---

## IV.1 Méthodologie

Dans le cadre de cette thèse, un système de réfrigération solaire, à adsorption, équipée d'un collecteur tubulaire fonctionnant avec le couple silicagel-eau, a été conçu, réalisé et testé dans les conditions météorologiques de Bou-Ismaïl, Algérie.

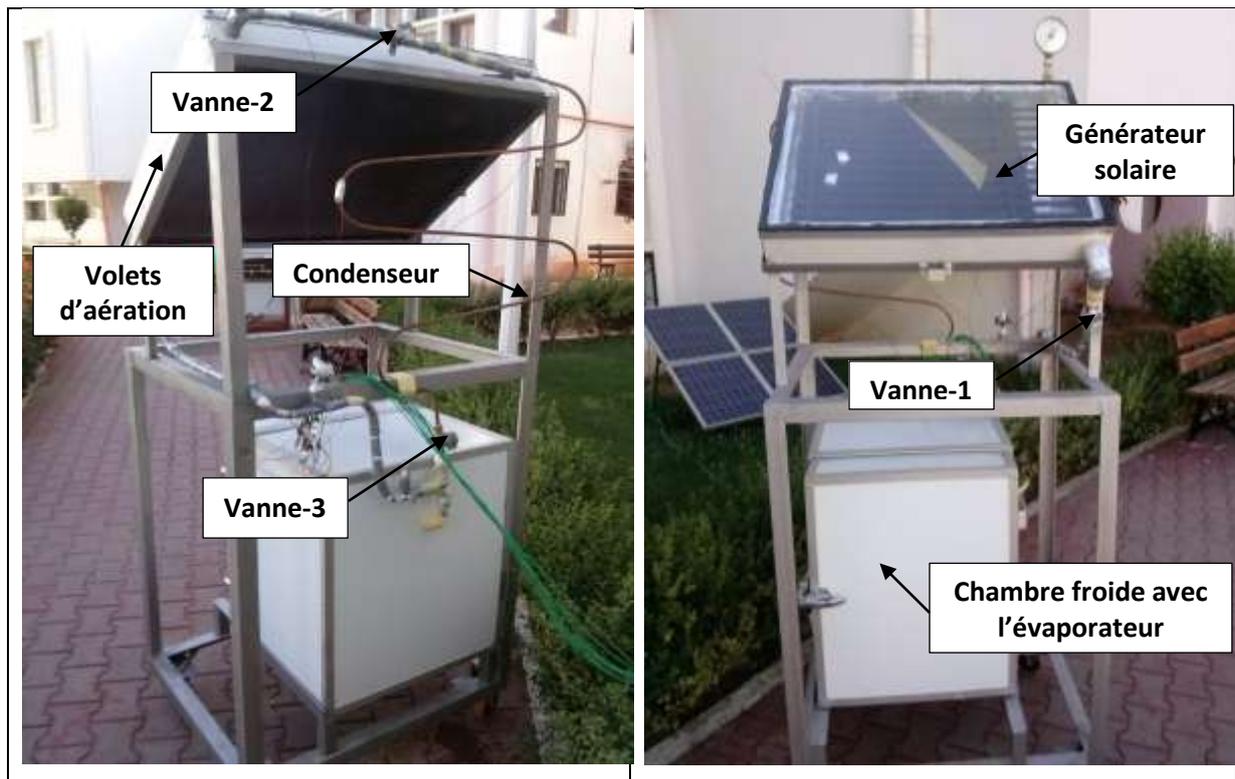
Nous présentons dans ce chapitre, une étude de caractérisation du fonctionnement de notre appareil doté d'une nouvelle configuration de collecteur à adsorbant car il est l'élément le plus important à étudier afin d'améliorer l'efficacité du système de réfrigération à adsorption. La répartition de la température dans le lit d'adsorbant, la fiabilité des composants du système, comme le capteur solaire, le condenseur et l'évaporateur sont présentés et discutés.

La première étape consiste à vérifier l'étanchéité de chaque élément de l'installation frigorifique avant le chargement du réfrigérant. Ces éléments sont ensuite connectés entre eux pour former la machine. Cette dernière, encore à l'état expérimental, est autonome du point de vue énergétique, c'est-à-dire qu'elle n'a pas besoin d'énergie d'appoint. Cependant, elle n'est pas entièrement automatique puisque des interventions manuelles restent nécessaires : une intervention le matin pour fermer les volets d'aération des capteurs et pour changer de circuit par un jeu de vannes et une intervention au milieu de l'après-midi pour ouvrir les volets d'aération et pour permuter les circuits. La machine effectue un cycle thermodynamique par jour. Toutes les grandeurs mesurées ont été enregistrées automatiquement. Le système expérimental est une unité d'adsorption utilisant le couple silicagel-eau. Cette unité se compose de trois éléments fondamentaux: un capteur solaire, un condenseur et un évaporateur. La figure (IV.1), montre une photographie du prototype d'adsorption expérimental installé au niveau de l'UDES. Le collecteur à adsorbant est équipé de deux sorties, l'une reliée au condenseur et l'autre est utilisée pour se connecter avec l'évaporateur.

Le déroulement d'un cycle frigorifique de notre machine à adsorption solaire se fait comme suit :

En début de journée: à 07 h 00, on ferme la vanne (1) entre le capteur et l'évaporateur. Les autres vannes (2 et 3) et les volets d'aération étant fermés. Le rayonnement solaire chauffe le capteur en faisant augmenter progressivement sa température ce qui entraîne une élévation de la pression dans le capteur.

Au milieu de la matinée : la pression dans le capteur devient importante sous l'effet de l'augmentation de la température dans le générateur à adsorbant. La vanne (2) étant ouverte, la désorption commence et les vapeurs d'eau vont migrer vers le condenseur pour être condensées. L'énergie solaire reçue par le capteur sert à entretenir la désorption du réfrigérant contenu dans le silicagel ce qui entraîne une diminution de la concentration du fluide dans l'adsorbant. Cette quantité du fluide désorbé correspond à la quantité du fluide condensé et qui s'écoule dans l'évaporateur.



**Figure IV.1.** Photo du réfrigérateur solaire à adsorption réalisé à l'UDES

Dans l'après-midi: l'irradiance solaire diminue régulièrement mais la température du capteur augmente encore tant que le taux des pertes thermiques est inférieur aux gains à cause de l'inertie du système. Les condensats sont totalement transférés dans l'évaporateur au travers de la vanne (3). Les volets d'aération du capteur sont ouverts pour favoriser le refroidissement de l'adsorbant. Ce dernier est déconnecté de l'évaporateur et le refroidissement se fait de façon globalement isostérique.

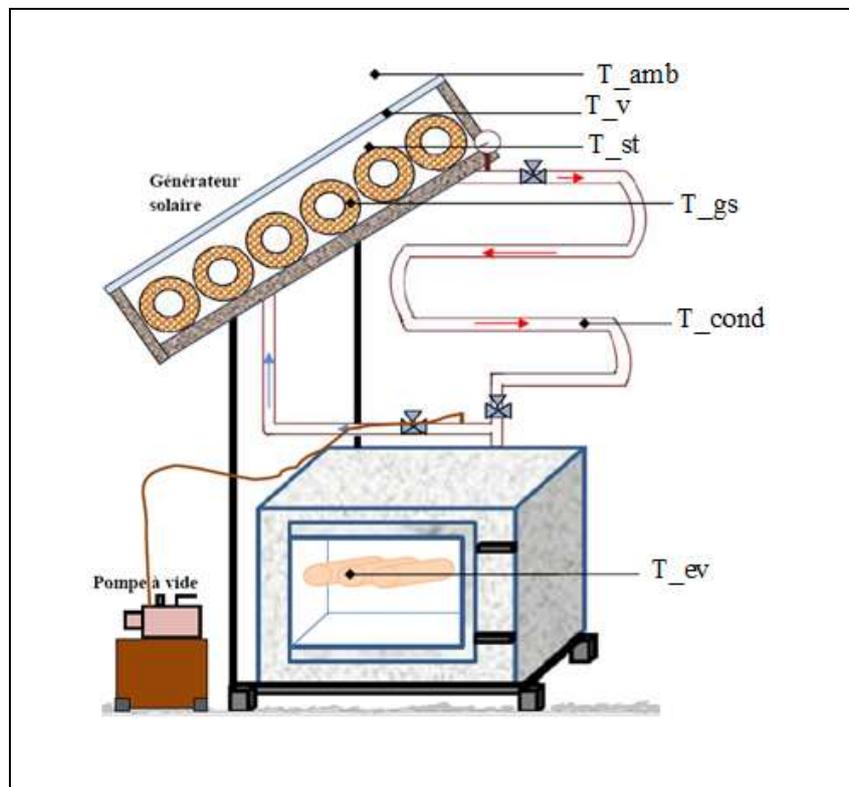
Durant la nuit : le refroidissement de l'adsorbant entraîne une diminution de la pression du collecteur. Cette dernière finit par atteindre la pression de saturation correspondant à la température de l'évaporateur ( $T_{ev}$ ). Dès l'ouverture de la vanne (1) pendant la nuit,

l'adsorption commence et un déséquilibre de phases se crée dans l'évaporateur. Le rétablissement de l'équilibre oblige le réfrigérant à s'évaporer et donc à produire du froid dans l'évaporateur.

#### IV.2 Résultats expérimentaux

Afin de vérifier et d'évaluer notre dispositif expérimental d'une manière plus réaliste, le système d'adsorption de réfrigération a été testé dans les conditions météorologiques de Bou-Ismaïl. La région de Bou-Ismaïl est située dans le nord-ouest de l'Algérie à une latitude de  $36.39^\circ$  Nord et une longitude de  $2.42^\circ$  Est.

Les principaux paramètres expérimentaux mesurés sont la température, l'intensité du rayonnement solaire et la pression.



**Figure IV.2.** Positions des thermocouples sur le prototype

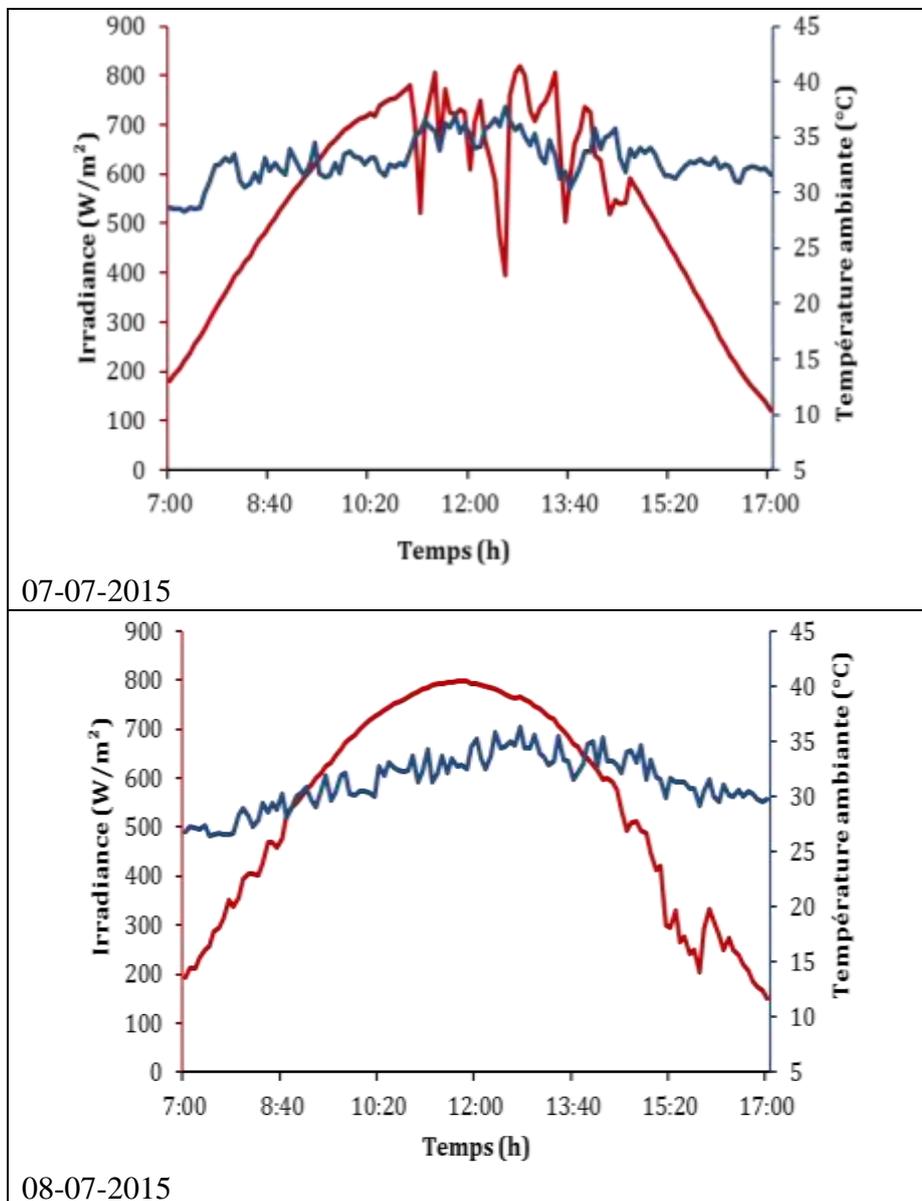
Le prototype est équipé de six thermocouples repartis entre le collecteur à adsorbant, le condenseur et l'évaporateur, comme le montre la figure (IV.2). Les températures mesurées sont la température ambiante ( $T_{amb}$ ), la température de la surface transparente ( $T_v$ ), la température de la surface d'un tube ( $T_{st}$ ), la température du gel de silice ( $T_{gs}$ ), la température du condenseur ( $T_{cond}$ ) et la température de l'évaporateur ( $T_{ev}$ ). Toutes les

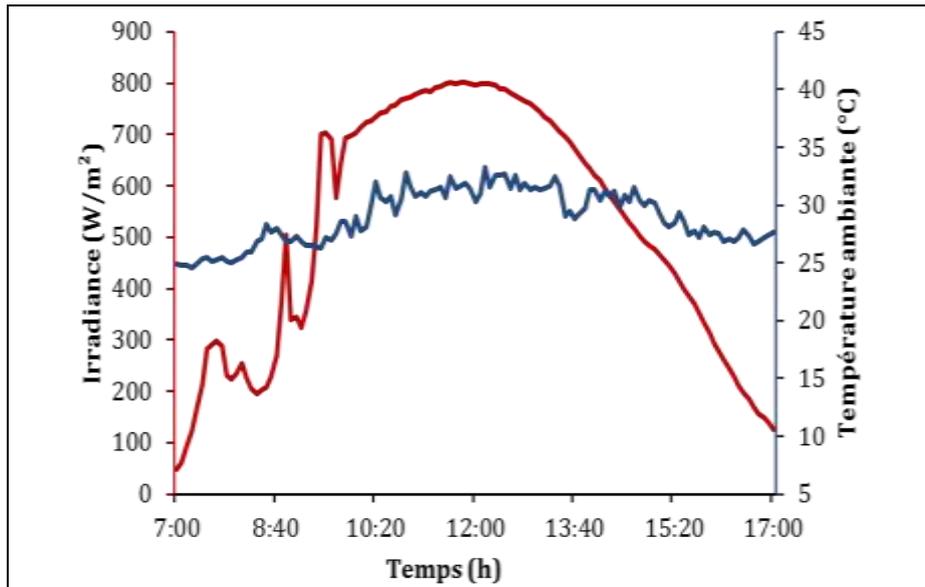
mesures ont été relevées à des intervalles de temps d'une minute pour tous les tests effectués.

#### IV.2.1 Les conditions climatiques et les radiations solaires

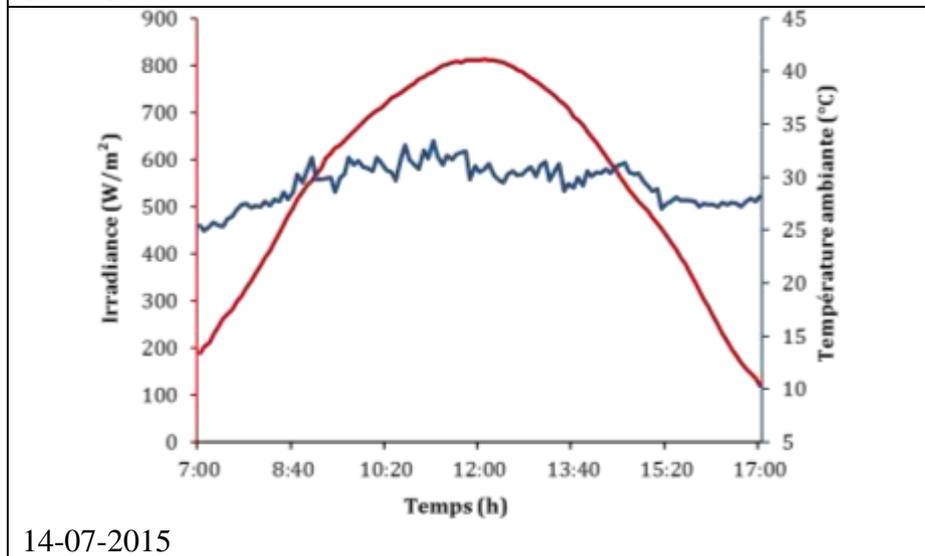
Dans cette étude, un pyranomètre de type EKO MS - 410 a été utilisé pour mesurer l'irradiance globale pendant la période de chauffage allant de 7h00 à 17 h00. Dans la figure (IV.3), nous avons illustré le profil de l'irradiance solaire globale et de la température ambiante mesurée pendant les jours de tests au mois de Juillet 2015.

Nous pouvons voir que le rayonnement solaire maximal varie de 750 à 830 W/m<sup>2</sup> au cours de la période allant de 11h00 à 13h30. En outre, pendant la période de chauffage, la valeur maximale de la température ambiante enregistrée était d'environ 35°C et la température minimale a atteint 25 °C.

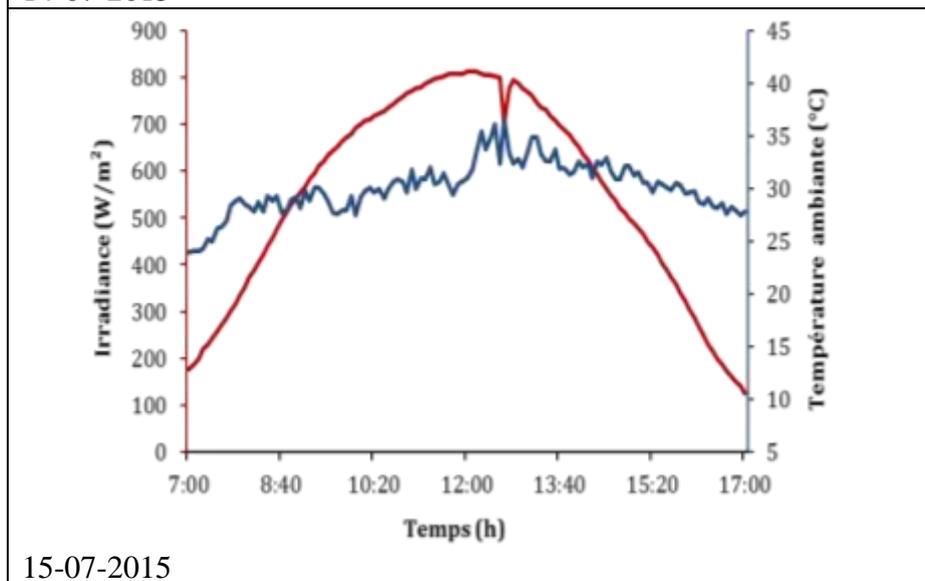




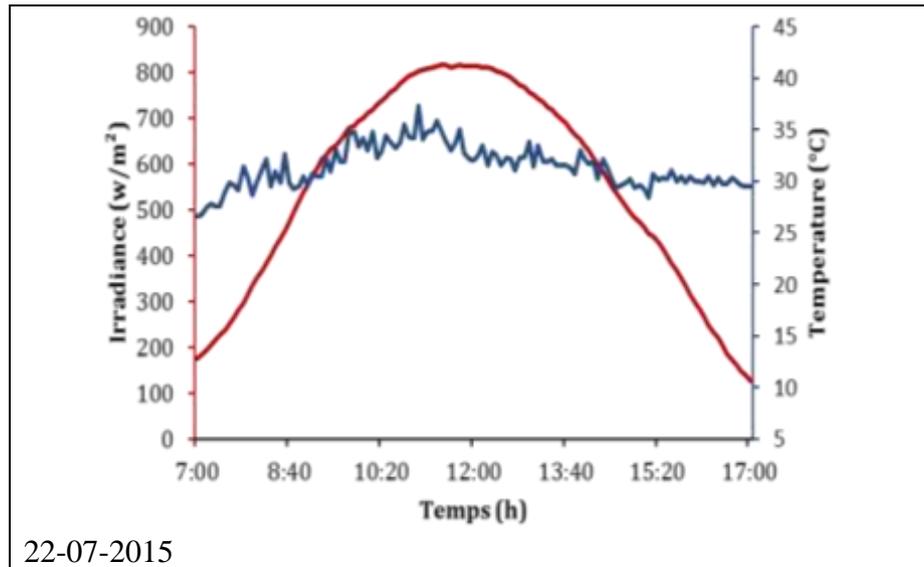
13-07-2015



14-07-2015



15-07-2015



**Figure IV.3.** Mesure des données solaires: l'irradiance globale et la température ambiante des jours de test

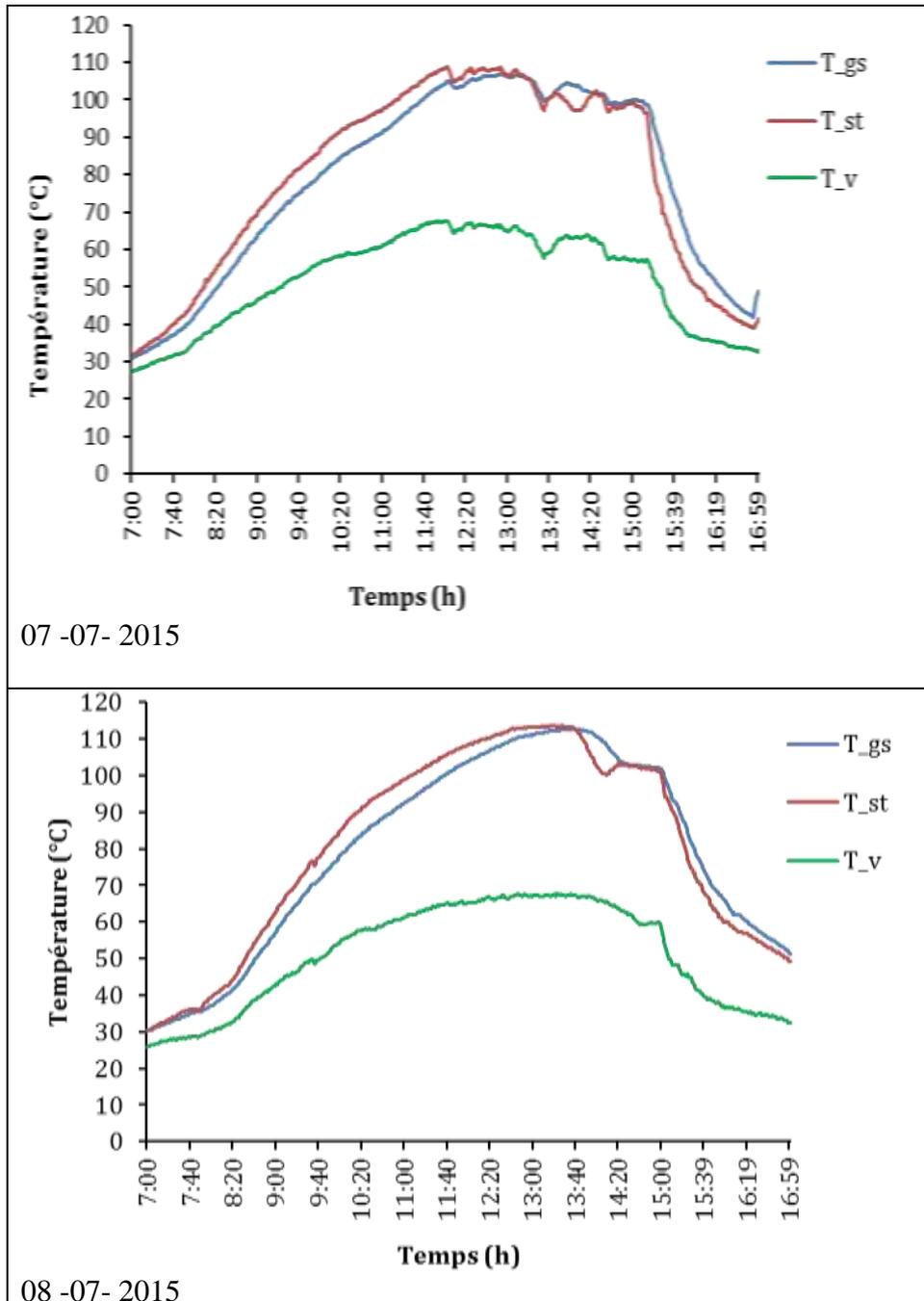
#### IV.2.2 Evolution de la température dans le lit adsorbant

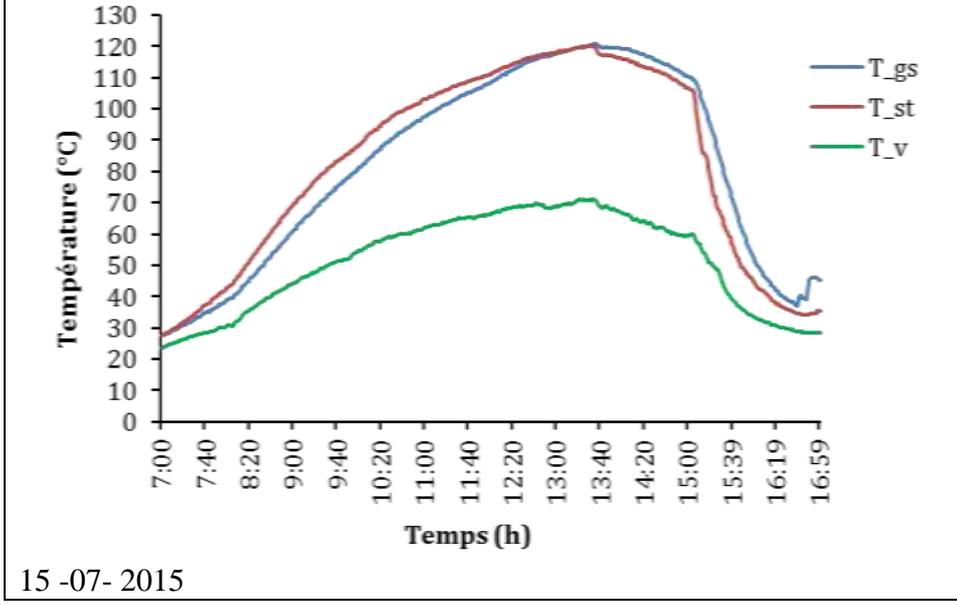
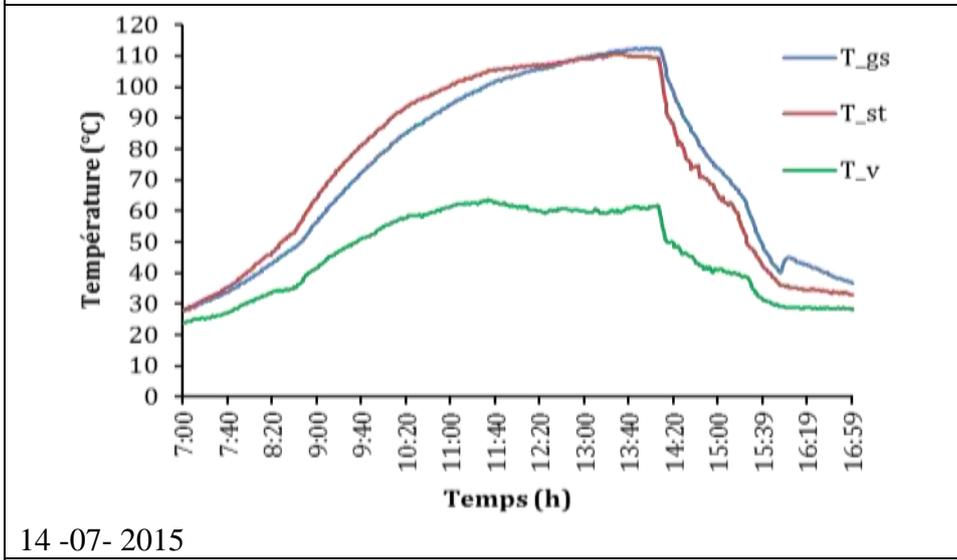
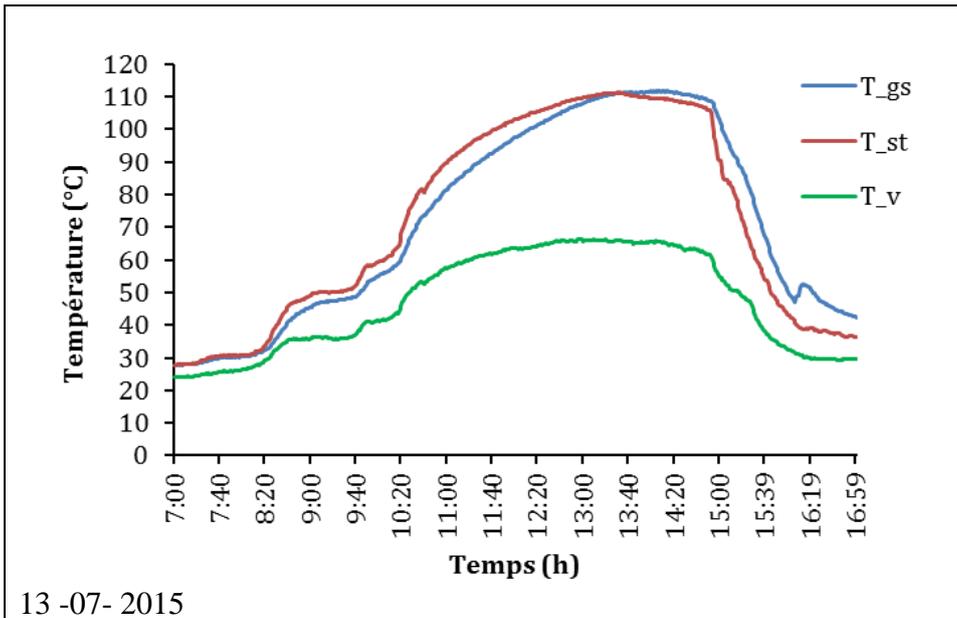
Sur la figure (IV.4), nous avons représenté l'évolution de la température  $T_{gs}$  dans le lit d'adsorbant de notre machine à adsorption.

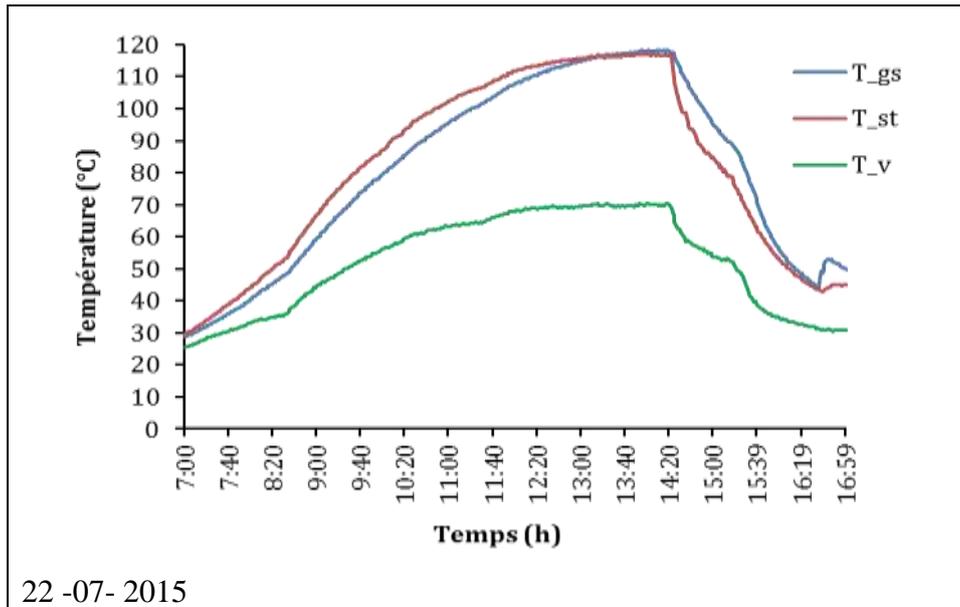
La température  $T_{gs}$  mesurée a été relevée à des intervalles de temps d'une minute. Le lit d'adsorbant a été progressivement chauffé par le rayonnement solaire, et la température du capteur solaire a évolué de la même façon. Les valeurs de la température  $T_{gs}$ , les plus élevées obtenues dans le lit d'adsorbant sont comprises entre 100 °C et 119 °C pour les jours de tests du mois de Juillet 2015. La température maximale du lit d'adsorbant est restée constante pendant la durée de la période de chauffage allant de 12:00 h à 14:00 h, correspondant à l'intensité maximale du rayonnement solaire. Dans l'après-midi, la température  $T_{gs}$  du lit d'adsorbant a diminué progressivement et a suivi la température ambiante, ce qui correspond à une diminution du rayonnement solaire.

Nous pouvons remarquer aussi, que les températures dans le lit d'adsorbant ont pratiquement la même allure pour les différents tests de jour présentés, ceci au cours du processus de chauffage - désorption et pendant la phase de pré-refroidissement. Les résultats montrent que la conception des différents éléments du capteur solaire, tel que l'espacement entre les tubes, la configuration tubulaire, le couvercle à simple vitrage et la surface réfléchissante sont propices à augmenter la température du lit d'adsorbant.

L'évolution de la température  $T_{st}$  de la paroi tubulaire pendant la période de chauffage est représentée sur la figure (IV.4). Nous remarquons que cette température augmente continuellement d'une valeur de température ambiante de 28 °C à une valeur de température maximale comprise entre 110 et 118 °C.







**Figure IV.4.** Variation de la température avec le temps : du gel de silice ( $T_{gs}$ ), de la surface de tube ( $T_{st}$ ), de la surface de la vitre ( $T_v$ ).

Comme nous pouvons le constater sur la figure (IV.4) où nous avons regroupé les différents résultats des tests, il n'y a pas une grande différence entre les valeurs des températures de l'adsorbant (matériau de gel de silice) et les valeurs des températures des parois tubulaires. Ces résultats montrent que la conception du capteur solaire influe sur le transfert de chaleur dans le générateur à adsorption.

Nous avons également représenté sur la figure (IV.4) l'évolution de la température  $T_v$  de la couverture transparente (simple vitrage). Nous remarquons que la valeur maximale de cette température varie de 65 à 70 °C au cours de la période de chauffage.

Le maximum de rayonnement solaire journalier, la température ambiante moyenne de la lumière du jour et de la nuit, la température maximale de condensation, la température du lit d'adsorbant et la pression maximale dans le collecteur, relevés pendant la période de chauffage-désorption des différents jours du mois de Juillet 2015 sont présentés dans le tableau (IV.1). Sur ce dernier nous pouvons voir aussi que la pression maximale dans le lit d'adsorbant varie de 80 à 100 mbar, ce qui correspond à la température du lit d'adsorbant pendant la période de chauffage - désorption. En outre, on constate que la température ambiante moyenne varie de 28 °C à 33 °C.

Jours de test	Irradiance maximum (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>mj</sub> (°C)	T <sub>cond</sub> (°C)	Temperature de desorption (°C)	Pression maximum (mbar)
01/07/2015	788	30	48	110	90
02/07/2015	773	28	45	108	90
06/07/2015	785	33	45	102	85
07/07/2015	819	33	46	108	80
08/07/2015	799	31	45	113	85
09/07/2015	774	30	50	107	80
12/07/2015	837	33	52	114	90
13/07/2015	801	33	52	111	90
14/07/2015	812	29	50	112	80
15/07/2015	811	30	53	117	95
20/07/2015	816	30	51	100	80
22/07/2015	815	31	45	117	100
23/07/2015	803	30	51	110	95

**Tableau IV.1.** Résultats expérimentaux obtenus avec notre système de réfrigération

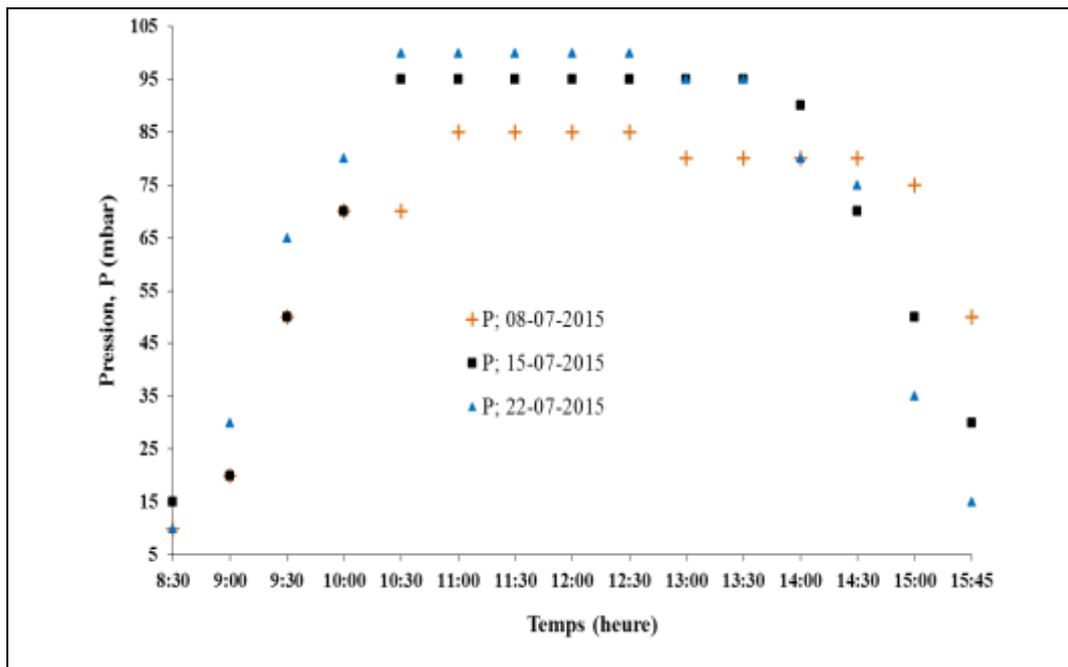
### IV.2.3 Changement de pression dans le lit d'adsorbant

Sur la figure (IV.5), nous avons représenté l'évolution de la pression, dans le lit d'adsorbant, en fonction du temps. Nous remarquons que la pression augmente en fonction du temps d'une valeur minimale de 10 mbar à une valeur maximale de 100 mbar. La pression maximale obtenue dans le lit d'adsorbant pour les tests réalisés, durant les différents jours, varie entre 80 et 100 mbar.

La figure (IV.5) montre aussi que la pression dans le lit d'adsorbant commence à diminuer au cours de la période allant de 14:00 h à 15:45 h pour atteindre une valeur minimale de l'ordre de 15 mbar.

De même sur cette même figure, nous avons représenté trois évolutions différentes de la pression dans le lit d'adsorbant correspondant à trois jours au Juillet 2015. Il ressort de cette figure qu'il y a une différence sensible de la valeur de la pression au cours des différents tests. Nous pouvons également voir que la tendance du profil de pression est

similaire dans les trois essais présentés au cours de la période de mesure allant de 08:30 h à 15:45 h. D'après les résultats des tests (8 ; 15 ; 22/07/2015), les valeurs des pressions maximales enregistrées dans le lit d'adsorbant au mois de Juillet 2015 sont respectivement de 80; 95 et 100 mbar. Cette différence dans les résultats expérimentaux obtenus peut être expliquée par les différentes données climatiques telles que l'intensité du rayonnement solaire, de la température ambiante pendant les jours d'essai, et la température maximale du lit d'adsorbant atteint au cours de la phase de chauffage - désorption.

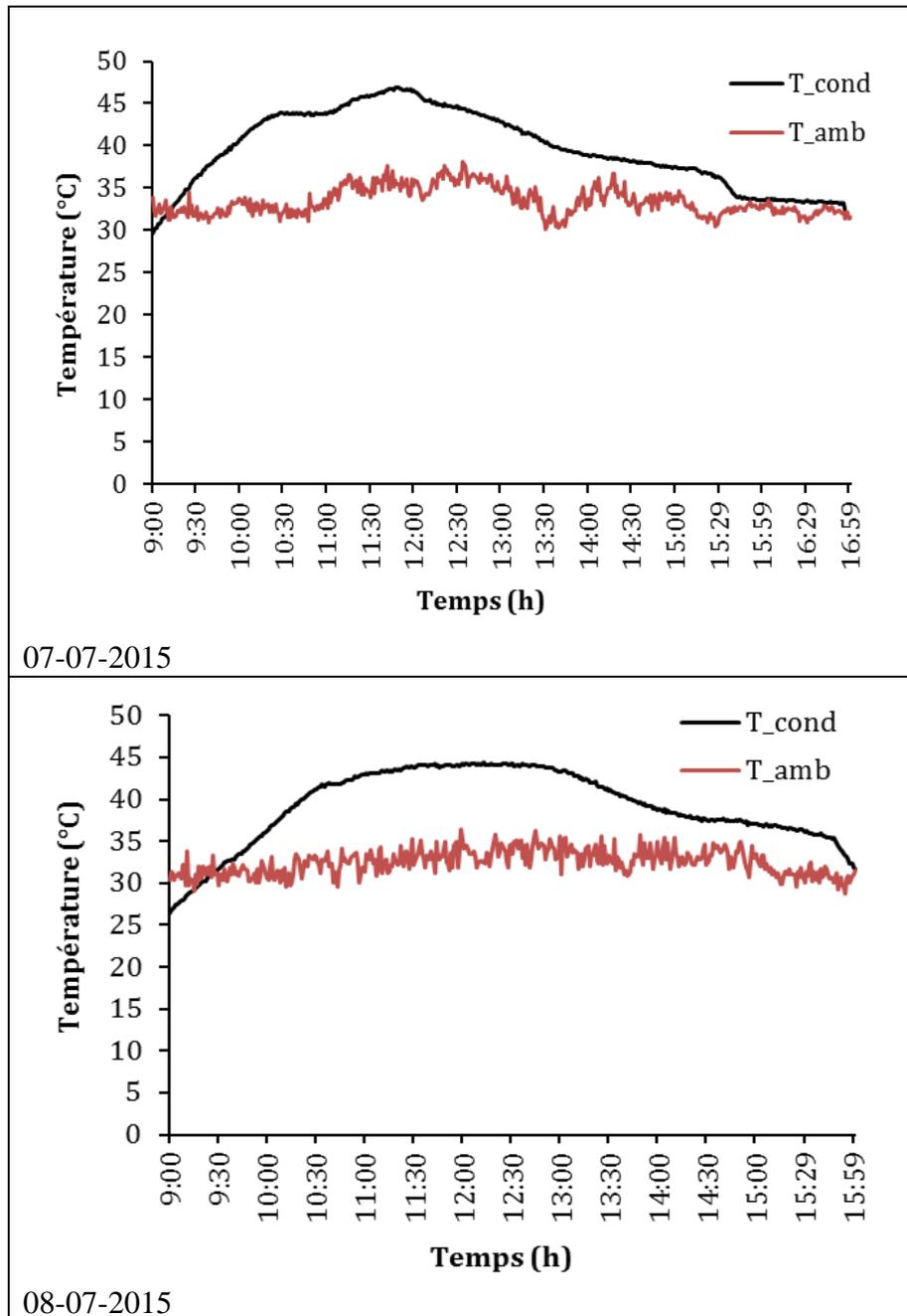


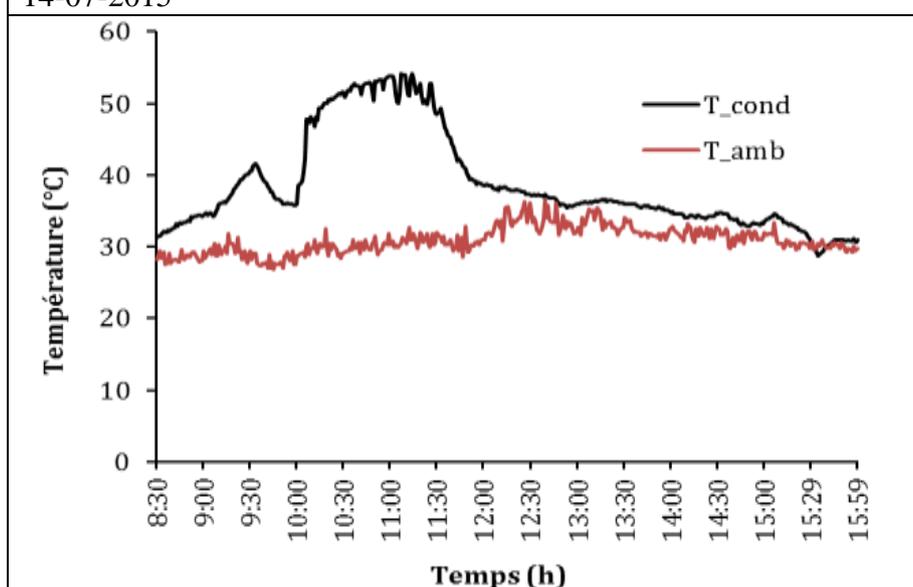
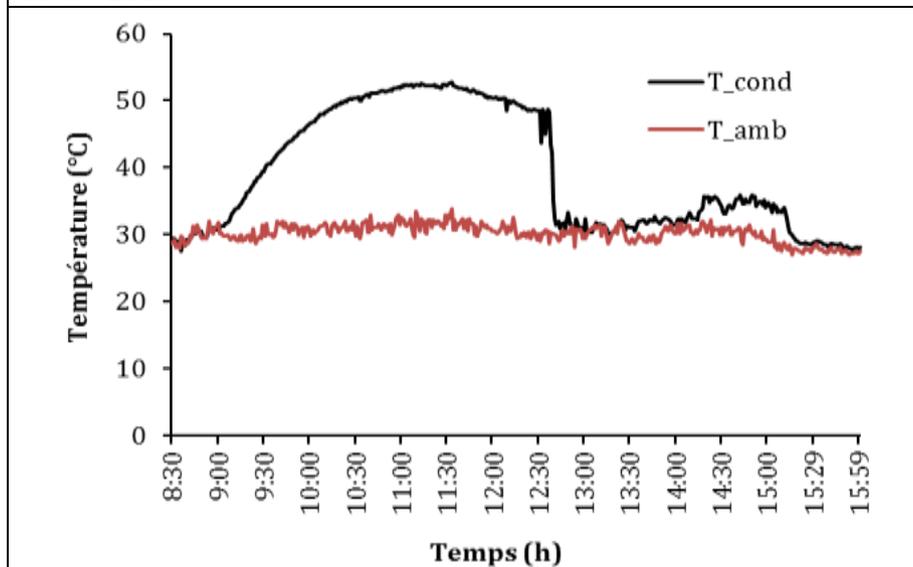
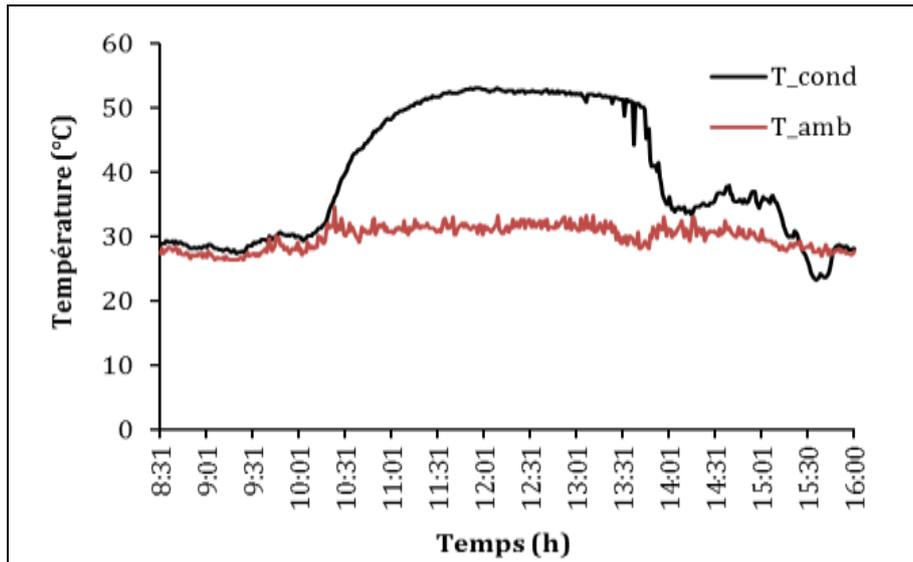
**Figure IV.5.** Variation de la pression avec le temps dans le lit d'adsorbant pendant la période de chauffage durant les jours: 8, 15 et 22 Juillet 2015.

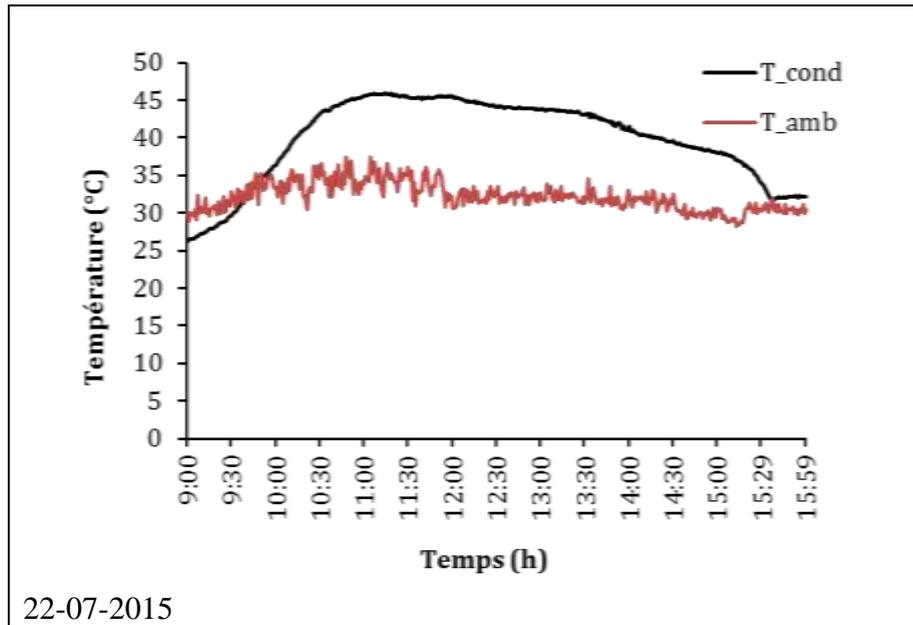
#### IV.2.4 Variation de la température dans le condenseur

La figure (IV.6) montre l'évolution de la température dans le condenseur avec le temps pendant la période de condensation. Dans cette phase, la vanne (2) placée entre le condenseur et le collecteur à adsorbant est ouverte et le condenseur est refroidi par air par convection naturelle. Le processus de désorption crée un gradient de pression qui entraîne la vapeur d'eau vers le condenseur. La température de condensation augmente progressivement en raison de l'augmentation de la température de la vapeur d'eau pendant la période 09h00 à 14h00. Durant les jours de tests, la température de condensation a atteint des valeurs comprises entre 25 et 53 °C.

La température du lit d'adsorbant diminue avec la diminution du rayonnement solaire, ce qui provoque une diminution de la température du condenseur. Dans ces conditions, le débit de la vapeur d'eau dans le condenseur est à son plus bas niveau et s'arrête lorsque la température du lit d'adsorbant devient équivalente à la température ambiante. L'évolution de la température de refroidissement du condenseur suit celle de la température ambiante.





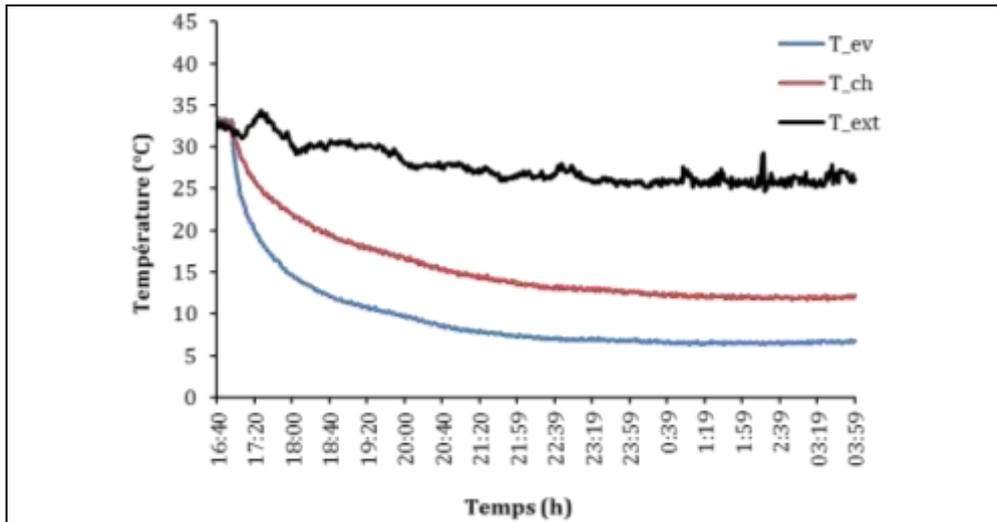


**Figure IV.6.** Variation de la température du condenseur ( $T_{cond}$ ) et la température ambiante ( $T_{amb}$ ) avec le temps.

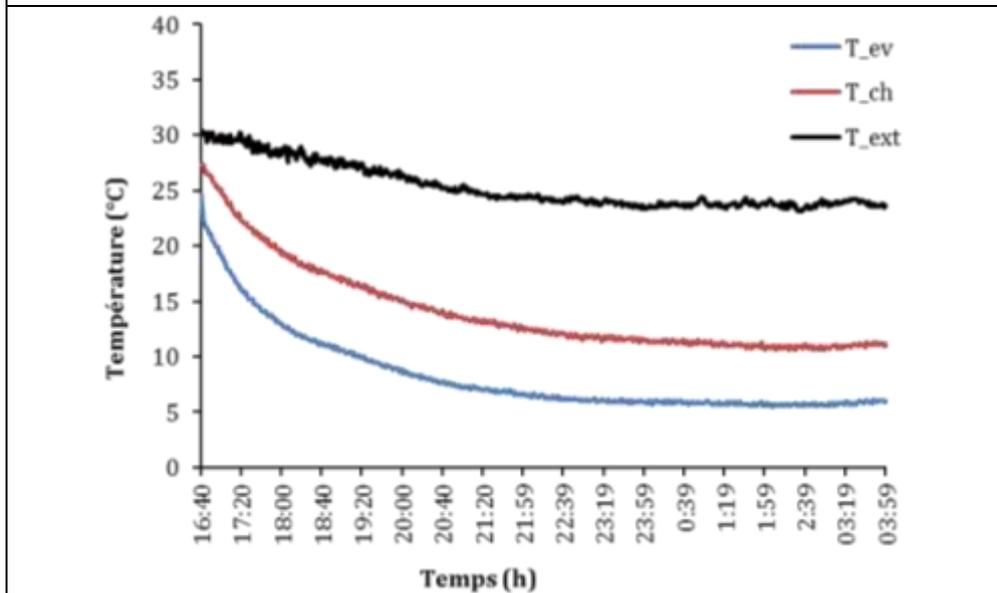
Nous pouvons également voir, sur la figure (IV.6), que le profil de la température de condensation varie d'une expérience à l'autre à cause des conditions météorologiques et le transfert de chaleur qui ne sont pas les mêmes. Les résultats expérimentaux montrent que les températures maximales relevées dans le condenseur varient de 45 à 53 °C.

### II.2.5 Evolution de la température dans l'évaporateur

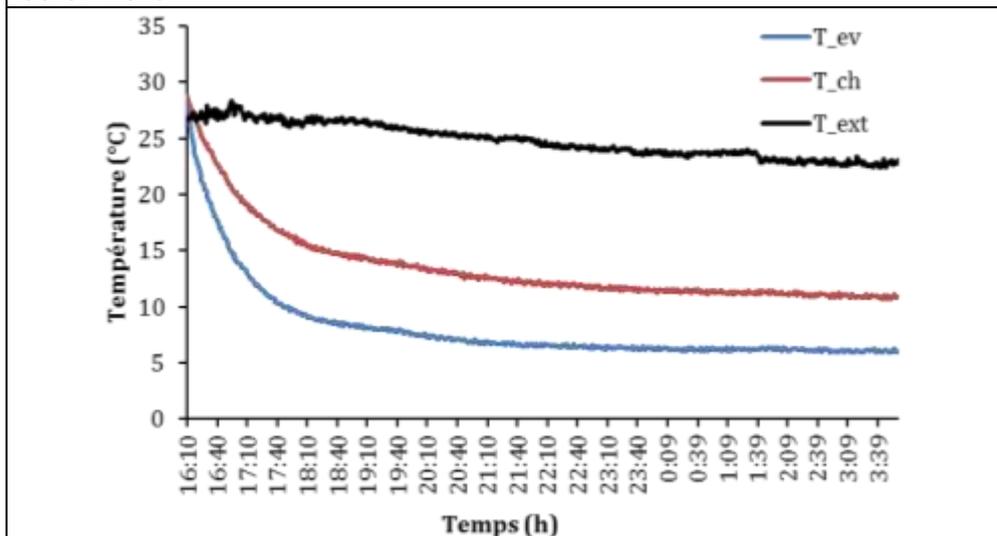
Sur la figure (IV.7) nous avons représenté la variation de la température au cours du temps dans l'évaporateur ( $T_{ev}$ ). Nous remarquons que l'allure de la température mesurée au cours du temps pour différents jours de tests est pratiquement la même sur la période allant de 16h40 à 04h00 du matin. Dans cette phase, une quantité de froid est produite par l'évaporation de l'eau à basse pression. La capacité d'absorption élevée du gel de silice permet d'adsorber de grandes quantités de vapeur, ce qui permet au phénomène de vaporisation de l'eau de se poursuivre et par la même occasion la production de froid dans la chambre. La température dans l'évaporateur commence à diminuer à partir de la température ambiante (30 °C) jusqu'à une température de l'ordre de (+5 °C). La température minimum atteinte dans l'évaporateur durant la phase adsorption - évaporation est reporté dans le tableau (IV.2). Nous remarquons que la différence entre les valeurs minimales de températures obtenues dans l'évaporateur varie de 2 à 3 °C. Cette différence peut être expliquée par l'influence de la température extérieure sur la chambre frigorifique.



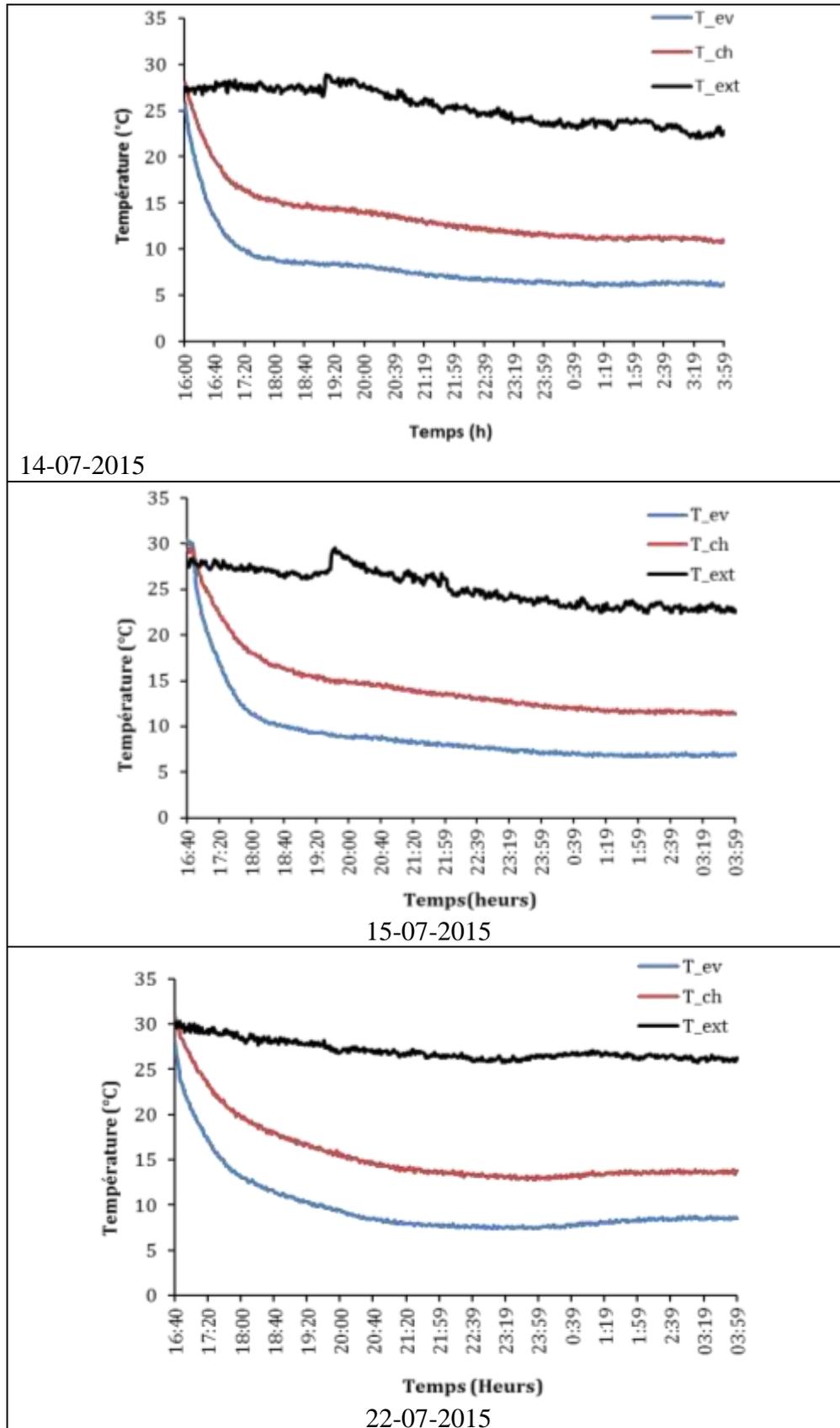
07-08-2015



08-07-2015



13-07-2015



**Figure IV.7.** Evolution de la température avec le temps dans l'évaporateur ( $T_{ev}$ ), la chambre froide ( $T_{ch}$ ), et l'extérieur ( $T_{ext}$ )

La figure (IV.7) présente aussi l'évolution de la température dans la chambre frigorifique ( $T_{ch}$ ) avec le temps durant la période de production de froid. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que, la température dans la chambre frigorifique d'un volume de 15 litres commence à diminuer à partir d'une température moyenne de 30 °C à une température moyenne de 13 °C.

### IV.3. Performance de l'installation

Dans cette étude expérimentale, l'estimation de la performance peut être exprimée par le terme COPs.

Le coefficient de performance solaire (COPs) d'un système de production de froid par adsorption est défini comme étant le rapport de la quantité de froid produite ( $Q_f$ ) par l'évaporateur et la quantité d'énergie thermique totale reçue par le capteur solaire au cours de la journée.

$$COP_s = \frac{Q_{fr}}{Q_{th}} \quad (IV.1)$$

Où;

$Q_{fr}$  : C'est l'énergie frigorifique produite dans l'évaporateur et qui peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$Q_f = M_e \cdot \left( L(T_{ev}) - \int_{T_{ev}}^{T_{co}} C_{pl} \Delta T \right) \quad (IV.2)$$

$Q_{th}$  : C'est l'énergie thermique reçue par le capteur durant la période de chauffage - désorption, et qui peut être calculée par la relation ci-dessous:

$$Q_{th} = \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot Ac \cdot dt \quad (IV.3)$$

$M_e$ : Quantité d'eau adsorbée pendant la période d'adsorption-évaporation (kg)

$I(t)$ : Incidente totale d'énergie par unité de surface du collecteur (W/m<sup>2</sup>),

$t$ : Temps (s).

$Ac$ : Surface totale du capteur solaire (m<sup>2</sup>),

$L (T_{ev})$ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ / kg)

$Cp_l$ : Capacité calorifique de l'eau liquide (4.180 kJ / kg)

Dans les conditions réelles de travail, avec une température moyenne de condensation  $T_{cond} = 45 \text{ °C}$  et une température de l'évaporateur  $T_{ev} = +5 \text{ °C}$ , le COP expérimental de notre système de réfrigération varie de 0,083 à 0,09 et l'énergie totale reçue par le capteur solaire est d'environ 19 (MJ/m<sup>2</sup>), comme le montre le tableau (IV.2) ci-dessous.

Jours de tests	Energies totales (kJ/m <sup>2</sup> )	$T_{ev}$ (°C)	COPs Expérimentale
01/07/2015	19320.5	+6	0.084
02/07/2015	18360.7	+6	0.090
06/07/2015	19061.9	+7	0.086
07/07/2015	18802.2	+6	0.087
08/07/2015	19082.8	+5	0.085
09/07/2015	18811.5	+6	0.087
12/07/2015	19583.7	+5	0.083
13/07/2015	18154.6	+6	0.090
14/07/2015	19511.6	+6	0.083
15/07/2015	19422.8	+6	0.084
20/07/2015	19183.1	+6	0.086
22/07/2015	19385.2	+8	0.083
23/07/2015	18496.5	+6	0.088

**Tableau IV.2.** COP expérimental du système de réfrigération à adsorption

La faible valeur du COP solaire expérimental obtenue peut être expliquée par la faible quantité de froid produite en raison de la faible quantité de réfrigérant adsorbé par rapport à l'énergie thermique reçue par le capteur solaire.

#### IV.4. Etude comparative

Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de notre étude de système de réfrigération solaire par adsorption, ont été comparés à ceux trouvés dans la littérature comme le montre le tableau (IV.3). Le coefficient de performance solaire COPs est le principal paramètre qui doit être étudié, à priori, pour caractériser les machines de

réfrigération à adsorption. Les valeurs du COP solaire obtenus avec notre machine varient de 0.083 à 0.09. Ces derniers sont comparables à ceux d'autres systèmes d'adsorption de réfrigération utilisant le couple charbon actif / méthanol (Manuel I. Gonzalez et al, 2007 [4]; Antonio Pralon Ferreira Leite et al, 2007 [7] ; F. Lemmini et al., 2005 [97]) trouvés dans la littérature. Ceci prouve la fiabilité des composants de travail de notre système de réfrigération solaire à adsorption.

	Couple adsorbant/adsorbat	COP Expérimental	Energie totale reçue (MJ /m <sup>2</sup> )
<b>Etude expérimentale présentée</b>	<b>Silicagel / water</b>	<b>0.083-0.09</b>	<b>19</b>
F. Lemmini., A. Errougani, 2005 [97]	Charbon actif / méthanol	0.04 – 0.08	15.3 to 25.5
Manuel I. Gonzalez et al., 2007 [4]	Charbon actif / méthanol	0.078 – 0.096	19.5 to 28
Antonio Pralon Ferreira Leite et al., 2007 [7]	Charbon actif / méthanol	0.085	23.7

**Table IV.3.** Comparaison de COPs de systèmes de réfrigération par adsorption

En comparant la conception de notre système de réfrigération solaire par adsorption avec d'autres systèmes trouvés dans la littérature (Antonio Pralon Ferreira Leite et al, 2007[7]; Zhao Huizhong et al, 2008 [98] ; F. Lemmini et al., 2005 [97]), cette étude représente bien une contribution à l'amélioration du capteur solaire qui est l'élément le plus influant sur la performance de la machine. Les principales améliorations de cette conception sont l'amélioration du transfert de chaleur en utilisant une surface réfléchissante et une meilleure répartition du lit d'adsorbant dans le capteur solaire.

## **Chapitre-V :**

---

# **Modélisation du capteur par l'approche de réseaux de neurones artificiels**

---

### **V.1 Introduction**

Le grand inconvénient des modèles paramétriques est justement la difficulté d'obtention des valeurs des paramètres, éventuellement en ligne lorsqu'ils varient. Leur détermination directe est souvent impossible et il faut utiliser des méthodes indirectes (identification) pour les obtenir.

Dans ce contexte, il nous a semblé intéressant d'étudier l'apport que pouvaient avoir les réseaux de neurones artificiels.

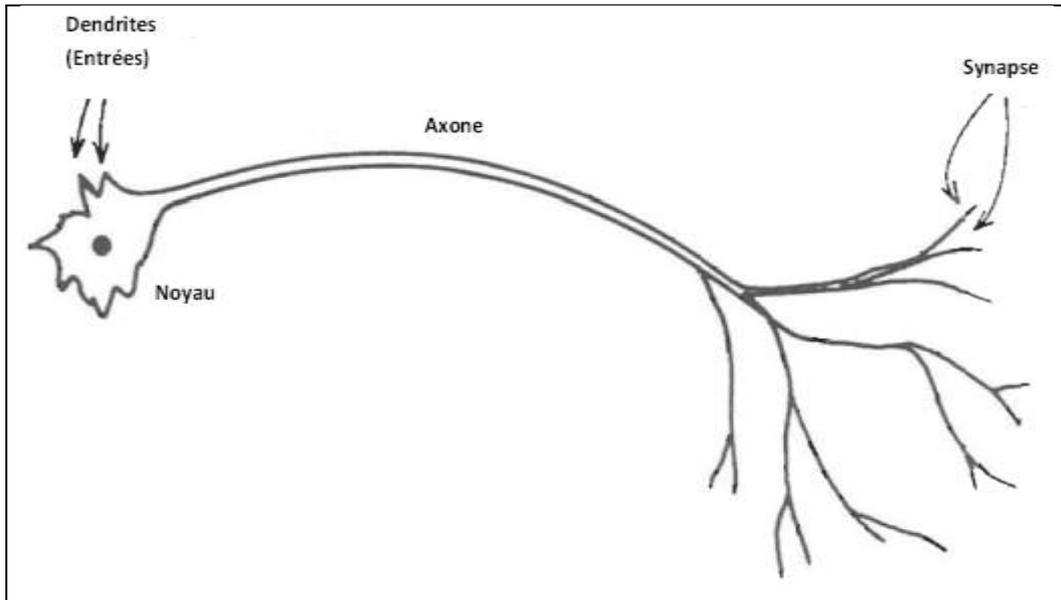
Le neurone est le processeur élémentaire de cerveaux. Chaque neurone traite l'information qui lui parvient localement, puis transmet aux autres neurones qui lui sont connectés l'information qu'il traite. Ces cellules peuvent apprendre en changeant l'intensité de leurs connexions avec d'autres cellules ou détruire ou même créer de nouvelles connexions. Elles peuvent aussi changer leurs règles de traitement de l'information. Ce processus de changement est appelé apprentissage et joue un rôle fondamental dans le comportement du neurone. Où le domaine d'application est très vaste [99] notamment en sciences et ingénierie.

Ce chapitre est consacré à la modélisation du capteur d'un réfrigérateur solaire à adsorption par l'application de l'approche de réseaux de neurones Artificiels. Nous utilisons l'environnement de MATLAB®Tools (Neural network Toolbox™), pour simuler le comportement thermique du capteur solaire (collecteur à adsorbant) durant la période de chauffage et de désorption. Nous rappelons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, à savoir les modèles statiques et dynamiques, le choix des entrées et sorties, l'élaboration de la base de données, la structure du réseau et l'algorithme d'apprentissage.

### **V.2 Principe d'un réseau de neurone artificiel**

Un réseau de neurones artificiels, généralement appelé «réseau neuronal», est un modèle mathématique ou un modèle de calcul qui s'inspire de la structure et / ou des aspects fonctionnels des réseaux de neurones biologiques, pour simuler des phénomènes de nature diverse, mathématiques, médecines, économies, météorologiques, sciences de l'ingénieur... [100]. Il se compose d'un groupe interconnecté de neurones artificiels et traite des informations en utilisant une approche connexionniste au calcul.

Un réseau neuronal artificiel est un système basé sur le réseau neuronal biologique, il est composé de trois éléments essentiels: dendrites, axone et synapses, comme le montre la figure (V.1).



**Figure V.1.** Schématisation d'un réseau neuronal biologique

Les principes fondamentaux des réseaux de neurones artificiels ont été formulés par Mc Culloch et Pitts en 1943. Ce modèle mathématique est constitué d'entrées et de sorties. Un poids est associé à chaque entrée, la somme pondérée des entrées passe par une fonction non linéaire pour produire la sortie de neurone. Il est commode de représenter graphiquement un réseau neuronal non linéaire comme indiqué sur la figure (V.2).

En mathématique, on peut décrire le modèle d'un réseau de neurones par l'équation suivante:

$v_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} x_i + b_k$	(V.1)
---------------------------------------	-------

La sortie du réseau de neurones a pour expression:

$y_k = f(v_k)$	(V.2)
----------------	-------

Avec :

$x_1, x_2, \dots, x_m$  : Les signaux d'entrées;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  : Les poids synaptiques respectifs du neurone k;

$v_k$  : La sortie du combineur linéaire due aux signaux d'entrées;

$b_k$  : Le biais;

$\varphi(v_k)$  : La fonction d'activation.

$y_p$  : Le signal de sortie du neurone.

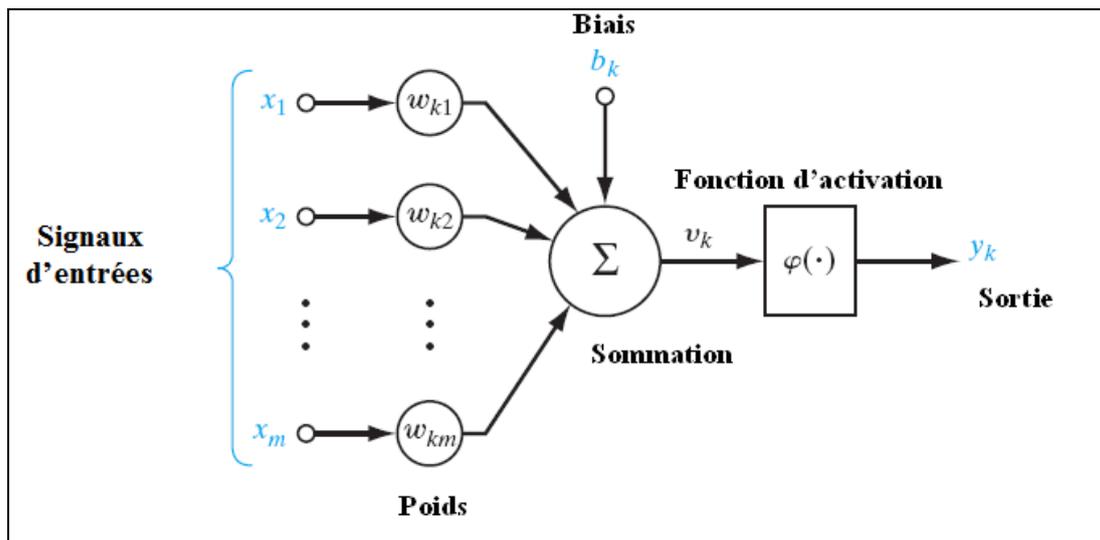


Figure V.2. Modèle non linéaire d'un neurone [101]

La fonction ( $\varphi$ ) est appelée fonction d'activation elle peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable.

### V.3 Modèles des réseaux de neurones

Un réseau de neurones est composé d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie dite à perceptron monocouche ou avec une ou plusieurs couches cachées dites à perceptron multicouche. Le perceptron multicouche, comme le montre la figure (V.3), est le plus connu des réseaux de neurones et le plus utilisé pour des problèmes d'approximations et de prédictions [102], [103], [104], [105],[106].

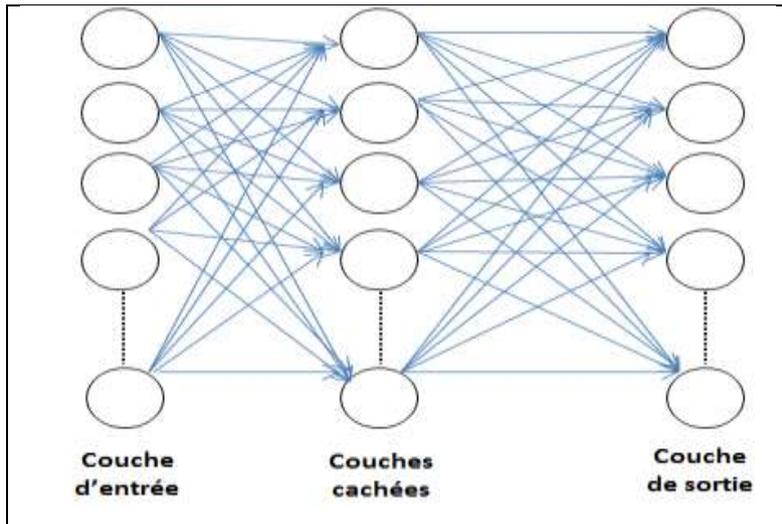


Figure V.3. Structure d'un perceptron multicouche

Les neurones sont arrangés en couches successives : la première couche qui forme le vecteur des données d'entrée est appelé couche d'entrée tandis que la dernière qui produit les résultats est appelée couche de sortie. Les couches qui se trouvent au milieu sont appelées couches cachées. Les réseaux de neurones sont classés selon deux modèles :

### V.3.1 Réseau de neurones statique

Un réseau statique ou réseau de neurones non bouclé, est un réseau dont le graphe des connexions est acyclique. Il réalise une fonction algébrique non linéaire de ses entrées. Ce type de réseau, comme le montre la figure (V.4) est caractérisé par la propagation vers l'avant [101], c'est-à-dire, l'information se propage dans un sens unique, des entrées vers les sorties.

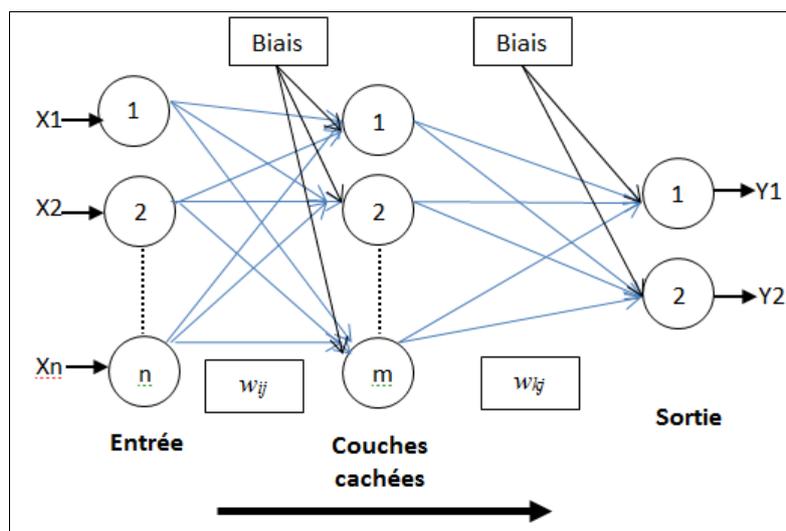
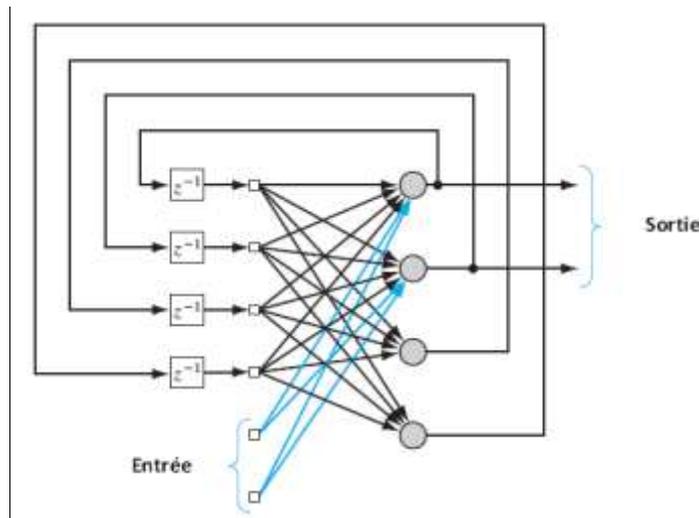


Figure V.4. Structure d'un réseau avec propagation vers l'avant

### V.3.2 Réseau de neurones dynamique

Un réseau dynamique ou réseau de neurones boucles [101], est un réseau dont le graphe des connexions est cyclique. Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (cycle). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération.



**Figure V.5.** Structure de réseau dynamique [101]

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche, comme le montre la figure (V.5). Ces connexions sont le plus souvent locales. Pour éliminer le problème de la détermination de l'état du réseau par bouclage, on introduit sur chaque connexion « en retour » un retard qui permet de conserver le mode de fonctionnement séquentiel du réseau.

### V.4 Algorithme d'apprentissage

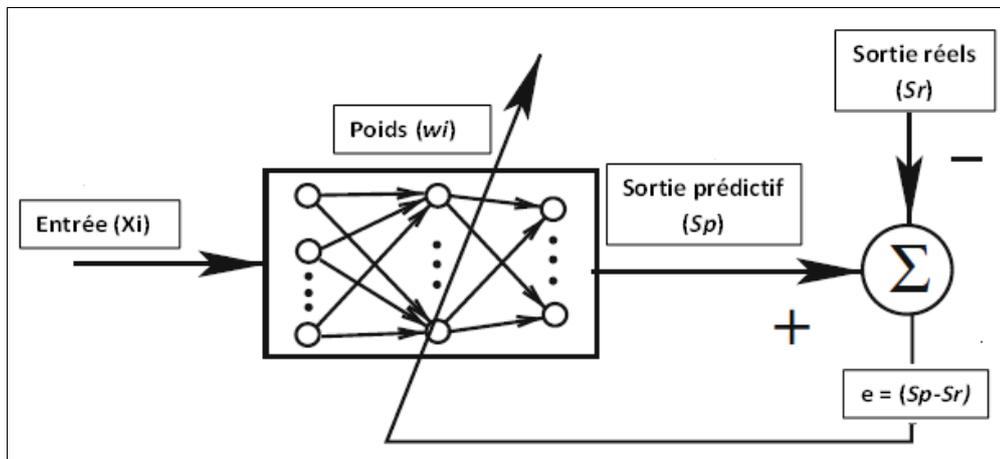
L'apprentissage c'est l'étape fondamentale des réseaux de neurones. Les règles d'apprentissage sont des algorithmes pour trouver des poids appropriés ( $w$ ) et / ou d'autres paramètres de réseau. L'apprentissage d'un réseau neuronal peut être considéré comme un problème d'optimisation non linéaire pour trouver un ensemble de paramètres de réseau. Ce type d'estimation de paramètres est également appelé algorithme d'apprentissage.

En général, les réseaux de neurones s'effectuent en modifiant les connexions entre les neurones par époque. Cette dernière est une exécution complète lorsque tous les exemples de formation sont présentés au réseau et sont traités en utilisant l'algorithme d'apprentissage

qu'une seule fois. Après l'apprentissage, un réseau de neurones représente une relation complexe et qui a la capacité de se généraliser.

### V.4.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé ajuste les paramètres du réseau par une comparaison directe entre la sortie réelle du réseau et la sortie générée, comme le montre la figure (V.6). L'apprentissage supervisé est un système de rétroaction en boucle fermée, où l'erreur est le signal de retour. La mesure d'erreur, qui montre la différence entre la sortie du réseau et la sortie des échantillons de formation, est utilisée pour guider le processus d'apprentissage.



**Figure V.6.** Apprentissage supervisé

La mesure de l'erreur est généralement définie par l'erreur quadratique moyenne (MSE).

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \|Sp - Sr\|^2 \quad (\text{V.3})$$

Avec :

n: le nombre de paires dans l'ensemble d'échantillons,

Sp: la partie de sortie prédictive par le réseau

Sr: la sortie de données réelles.

La nouvelle valeur de l'erreur quadratique moyenne (MSE) est calculée après chaque époque. Le processus d'apprentissage est terminé lorsque la valeur de « e » est suffisamment petite ou si un critère de défaillance est atteint.

### V.4.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé n'implique aucune valeur cible. Il essaie d'associer automatiquement les informations des entrées avec une réduction intrinsèque de la dimensionnalité des données ou de la quantité totale de données d'entrée, comme le montre la figure (V.7).

L'apprentissage non supervisé est uniquement basé sur les corrélations entre les données d'entrée et est utilisé pour trouver les motifs significatifs ou les caractéristiques dans les données d'entrée sans l'aide d'un tiers.

L'apprentissage non supervisé est particulièrement adapté à l'apprentissage biologique dans la mesure où il ne s'appuie pas sur un tiers et qu'il utilise des primitives intuitives comme la concurrence et la coopération neuronale.

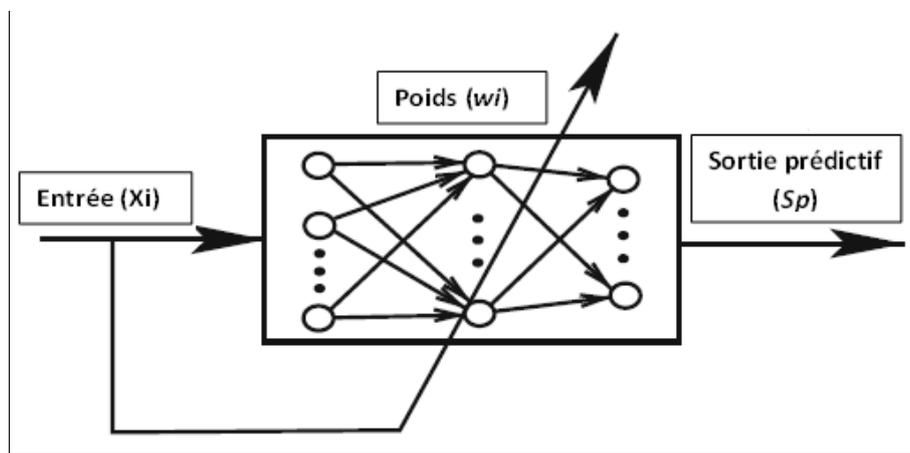


Figure V.7. Apprentissage non supervisé

### V.4.3 Méthode de rétro-propagation

Le perceptron multicouche est un des réseaux de neurones les plus utilisés pour des problèmes d'approximation, de classification et de prédiction. Il est habituellement constitué de deux ou trois couches de neurones totalement connectés où l'information se propage dans un seul sens, de la couche d'entrée vers la couche de sortie.

Le terme «rétro-propagation » se réfère à la manière dont le gradient de la fonction de performance est calculée par rétro-propagation de l'erreur depuis la couche de sorties jusqu'à la couche d'entrées. La technique de rétro-propagation est la plus utilisée dans la modélisation par réseaux de neurones artificiels. Elle consiste à mesurer l'erreur entre les sorties désirées  $d(n)$  et les sorties observées  $y(n)$  [107].

L'objectif de la méthode de la rétro-propagation est d'adapter les poids par neurone de façon à minimiser une fonction donnée par :

$E(n) = \frac{1}{2} \sum_j e_j(n)$	(V.4)
------------------------------------	-------

Avec :

$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n)$	(V.5)
----------------------------	-------

$e_j(n)$  : erreur pour le neurone j et la donnée d'entrainement n

$d_j(n)$  : sortie désirée du neurone j

$y_j(n)$  : sortie observée

### **V.5 Les réseaux de neurones dynamiques appliqués à notre cas**

Les collecteurs solaires sont utilisés dans de nombreuses applications différentes telles que le chauffage de l'eau, le séchage des matériaux agricoles, les systèmes de production du froid par énergie solaire, etc. Dans le cadre de la conception et du contrôle de l'opération de ces équipements, il peut être nécessaire de comparer les performances de plusieurs types de capteurs solaires prenant en compte les aspects thermiques et économiques. Pour ces raisons, nous nous sommes intéressés dans notre étude au développement d'un modèle de réseaux de neurones dynamique du générateur solaire en utilisant l'environnement de MATLAB®. Ce modèle neuronal dynamique (NARX) a été développé pour étudier le comportement thermique du capteur solaire (collecteur à adsorbant) et pour prédire la température dans le collecteur à adsorbant, basé uniquement sur des données réelles.

Les réseaux neuronaux dynamiques (récurrents) ont été largement utilisés pour la modélisation de systèmes dynamiques non linéaires [108], [109]. Parmi les différents types de réseaux neuronaux récurrents, le réseau de neurones NARX, est l'un des plus intéressants pour la modélisation des entrées-sorties des systèmes dynamiques non linéaires et de prédiction, [110], [111].

#### **V.5.1 L'équation de définition du modèle NARX**

Le réseau neuronal autorégressif non linéaire à entrées exogènes (NARX) est un réseau dynamique récurrent, avec des connexions de rétroaction entourant plusieurs couches du réseau. Le modèle NARX est basé sur le modèle linéaire autorégressif de réseaux neuronaux à entrées exogènes (ARX). Il est utilisé généralement dans la modélisation des séries de temps [112].

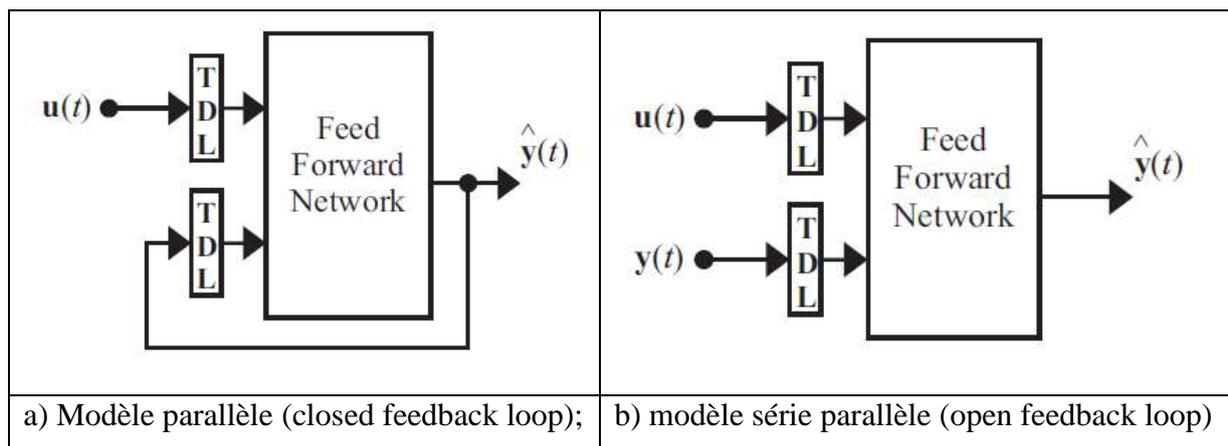
L'équation de définition du modèle NARX est la suivante [112]:

$$y(t) = f[y(t-1), y(t-2) \dots y(t-n_y), u(t-1), u(t-2) \dots u(t-n_u)] \quad (V.6)$$

La sortie d'un modèle NARX,  $y(t)$ , est liée par un nombre de sorties antérieures et d'entrées exogènes ( $u(t-1)$ ).

Dans cette équation, le terme ( $u(t-1)$ ) représente la valeur de la variable d'entrée exogène à l'instant ( $t-1$ ),  $y(t)$  est la sortie du réseau qui représente la valeur de la variable au temps ( $t$ ), et  $f$  est une fonction non linéaire.

Le principal avantage, du réseau NARX à série-parallèle, est à une architecture purement de propagation vers l'avant, et la rétro-propagation statique est utilisé pour la formation (V.8b). Une fois, que le processus d'apprentissage (boucle ouverte) est terminé avec succès, la boucle de retour est fermée comme le montre la figure (V.8a).



**Figure V.8** Architecture de NARX [112]

Les perceptrons multicouches utilisés dans notre étude sont présentés par une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie, comme le montre la figure (V.9). Les variables sont la température ambiante et l'irradiance solaire qui sont utilisées comme des paramètres d'entrées et la température de collecteur adsorbeur comme un paramètre de sortie dans notre réseau neuronal.

Dans les réseaux dynamiques, la sortie dépend à la fois de l'entrée actuelle du réseau et des entrées, sorties ou états actuels ou antérieurs du réseau [113].

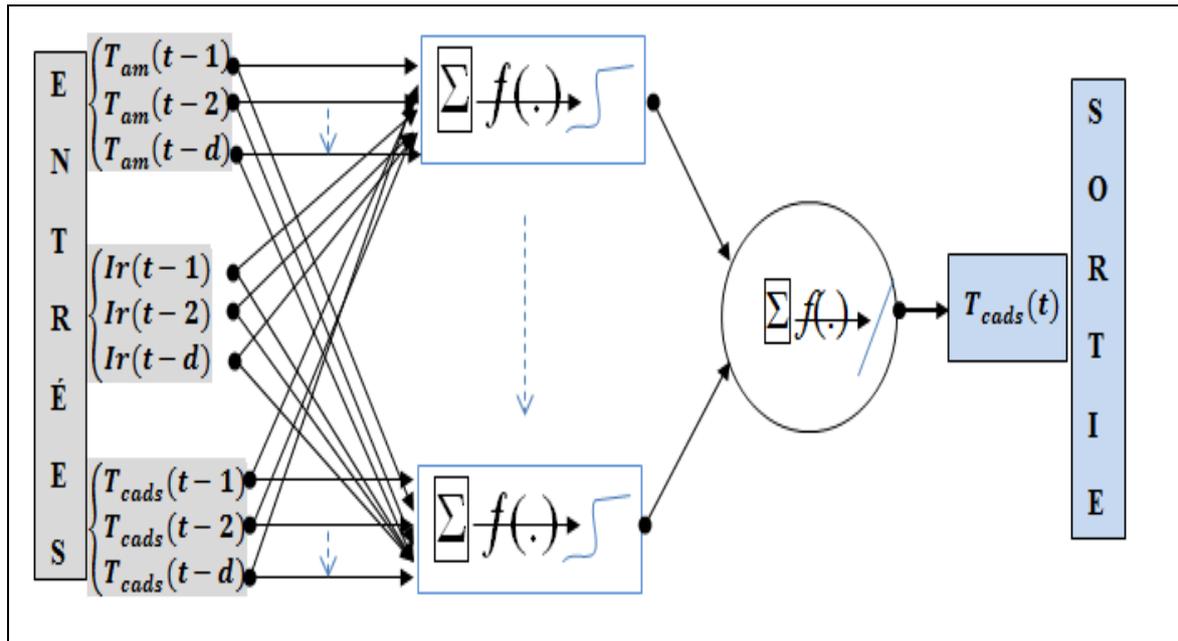


Figure V. 9 Modèle NARX pour prédire de la température de collecteur

Le modèle NARX peut être également exprimé mathématiquement comme suit:

$$T_{cads}(t) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot f \left( \alpha_{i0} + \sum_{j=1}^d w_{ij} \cdot T_{cads}(t-j) + \sum_{k=1}^d w_{ik} \cdot T_{amb}(t-k) + \sum_{l=1}^d w_{il} \cdot I_r(t-l) \right) + \beta_0 \quad (V.7)$$

Avec ;

$\alpha_{i0}, \beta_0$  : les biais.

$W_i, w_{ij}, w_{ik}, \dots, w_{il}$  : les poids synaptiques respectifs du neurone.

$T_{amb}$  : Température ambiante

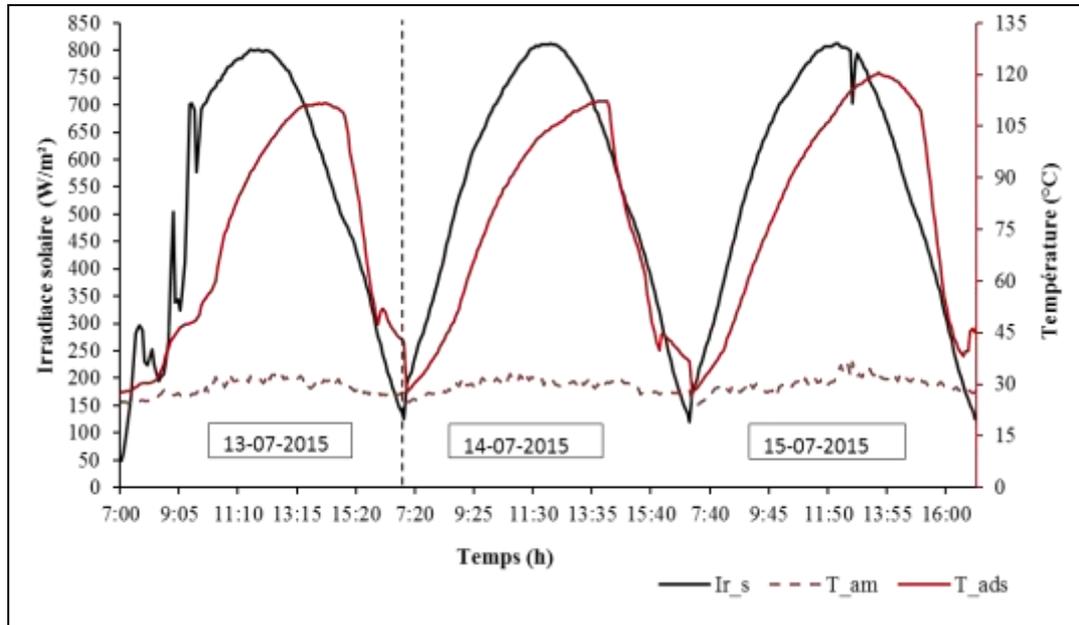
$I_r$  : Irradiance solaire.

$T_{cads}$  : Température du collecteur adsorbant

### V.5.2 Identification des paramètres

Dans cette étude, un modèle de réseau de neurones artificiels a été développé pour prédire la température dans le collecteur à adsorbant, basé uniquement sur des mesures et des données expérimentales de notre système de réfrigération solaire à adsorption fonctionnant avec le couple gel de silice - eau. Les principaux paramètres mesurés sont : l'irradiance solaire, la température dans le générateur et la température ambiante. Enfin, la mise en service

du prototype et les mesures ont été réalisées pendant trois jours successifs 13, 14, et 15 de juillet 2015, figure (V.10).



**Figure V. 10** Résultats expérimentaux du système

## V.6 Méthode de résolution

Le modèle neuronal développé par l'utilisation de l'environnement MATLAB®, est basé sur l'ensemble des données obtenues, composé de 363 vecteurs d'entrée et de leurs vecteurs de sortie.

Les valeurs, entrées et sorties des réseaux sont redimensionnées pour avoir des variables variant entre -1 et 1, afin de rendre le réseau plus efficace et avoir de meilleurs résultats.

L'équation utilisée pour la normalisation des valeurs est donnée ci-dessous [112]:

$$val^{nor} = 2 \times \frac{(val - val^{min})}{(val^{max} - val^{min})} - 1 \quad (V.7)$$

Ces données sont divisées en trois sous-ensembles. Le premier est celui de la formation ou de l'apprentissage et représente (50%) du total. Il est utilisé pour le calcul du gradient et la mise à jour des poids et des biais du réseau afin de minimiser la fonction de performance du réseau. La formation dans le réseau neuronal est le processus par lequel un réseau de neurones apprend et reconnaît la relation entre les entrées et les sorties.

Le second sous-ensemble est celui de la validation qui représente (25%) des données totales. La validation est la dernière étape, où le modèle de réseau neuronal entraîné est évalué

par un ensemble de données qui n'a pas été utilisé pour la formation du réseau. L'erreur de validation diminue au cours de la phase de formation.

Enfin, le sous-ensemble de test qui représente (25%) des données totales, est utilisé après l'étape de formation et de validation du modèle neuronal pour un test final. Dans la plupart des cas, cette technique d'essai montre l'acceptation adéquate de modèle de réseau neuronal. La performance du vecteur de test peut être utilisée pour mesurer la façon dont le réseau se généralise au-delà des données primaires et de validation.

Avant de former le modèle de réseau neuronal, les valeurs initiales des poids et des biais doivent être déterminées automatiquement ou peuvent être ajustées manuellement au moyen d'écritures et de codes. Le nombre de neurones de la couche cachée a été sélectionné par plusieurs essais pour estimer le modèle.

La fonction  $f(.)$  est appelée fonction d'activation comme indiqué sur la figure (V.10). Elle peut être une fonction linéaire ou non linéaire. Le modèle NARX utilisé dans notre application est défini par deux fonctions, une fonction linéaire dans la couche de sortie et une fonction d'activation dans la couche cachée, est défini par l'équation suivante [112]:

$$f(v) = \text{tansig}(v) = \frac{e^v - e^{-v}}{(e^v + e^{-v})} \quad (\text{V.8})$$

$v$ : représente la sortie de modèle neuronal et  $f$  une fonction de transfert dans la couche de sortie.

Notre modèle basé sur le réseau perceptron multicouche d'architecture, utilise l'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation (back-propagation). Cet algorithme est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones [114]. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Cette méthode est basée mathématiquement sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables. De telles façons que l'erreur commise en sortie du réseau est rétro-propagée vers les couches cachées.

De manière générale, le sens de transfert de l'information dans un réseau est défini par la nature des connexions qui sont directes ou récurrentes. Selon le chemin suivi par l'information dans le réseau on peut classer les réseaux de neurones en deux grandes catégories : les réseaux "feed-forward" et les réseaux "feed-back" [112].

La fonction de formation en réseau qui met à jour les valeurs de poids et de biais selon l'optimisation de Levenberg-Marquardt, [114] a été modifiée pour inclure la technique de

régularisation. Il minimise une combinaison d'erreurs carrées et de poids et détermine ensuite la combinaison correcte pour produire un réseau qui se généralise.

Lorsque la formation est terminée, les performances du réseau peuvent être vérifiées pour voir si des changements doivent être apportés au processus de formation, à l'architecture du réseau ou aux ensembles de données.

La performance du modèle a été évaluée par l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) :

$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n (y_r - y_p)^2$	(V.9)
--	-------

et

$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_i^n (y_r - y_p)^2}{\sum_i^n (y_p)^2} \right)$	(V.10)
--	--------

Avec ;

n: le nombre des données

$y_p$  : les sorties de réseau

$y_r$  : les données réelles

### V.7. Résultats numériques

Pour trouver un modèle de réseau de neurones (NARX) adapté pour la prédiction de la température dans le générateur à adsorbant, nous avons exécuté par l'utilisation de l'environnement MATLAB l'architecture de réseaux, (2-2-1).

Le modèle NARX utilisé ici est un réseau à deux couches, avec une fonction de transfert sigmoïde dans la couche cachée et une fonction de transfert linéaire dans la couche de sortie. Ce modèle utilise des lignes de retard (d) pour stocker les valeurs précédentes des séries d'entrée et de sortie. Tout d'abord, on charge les données d'apprentissage en utilisant les lignes de retard avec quatre retards pour l'entrée et la sortie.

La formation commence avec le cinquième point de donnée. Il y a trois entrées pour l'architecture de réseau série-parallèle, la température ambiante ( $T_{amb}$ ), l'irradiation solaire ( $I_r$ ), (entrées exogènes) et la température du collecteur à adsorbant ( $T_{cads}$ ).

La figure (V.11) montre l'évolution des erreurs quadratiques moyennes. Ces dernières diminuent continuellement jusqu'à des valeurs suffisamment faibles et qui montrent que les poids sont améliorés, et que le réseau s'est formé.

La formation du réseau par l'algorithme de Levenberg-Marquardt [114] a été arrêtée après 160 itérations parce que les différences entre les erreurs d'apprentissage et les erreurs de validation ont commencé à augmenter.

L'algorithme d'entraînement BP est un algorithme de descente en gradient. Il tente d'améliorer les performances du réseau en minimisant l'erreur totale en changeant les poids le long de son gradient. Le tableau (V.1) donne la performance du modèle NARX développé.

Données	MSE	R <sup>2</sup>
Formation (50%)	1.31786	0.99919
Validation (25%)	2.07505	0.99875
Test (25)	1.91609	0.99864

**Tableau V.1** Performance du modèle NARX

La figure (V.12) montre les graphiques des coefficients de régression (R), dans lesquels les cercles sont les points de données et la ligne représentant le meilleur ajustement entre les sorties et les cibles. Les coefficients de régression obtenus lors de la formation, la validation et le test de notre modèle sont parfaits et dans les limites acceptables par la configuration étudiée.

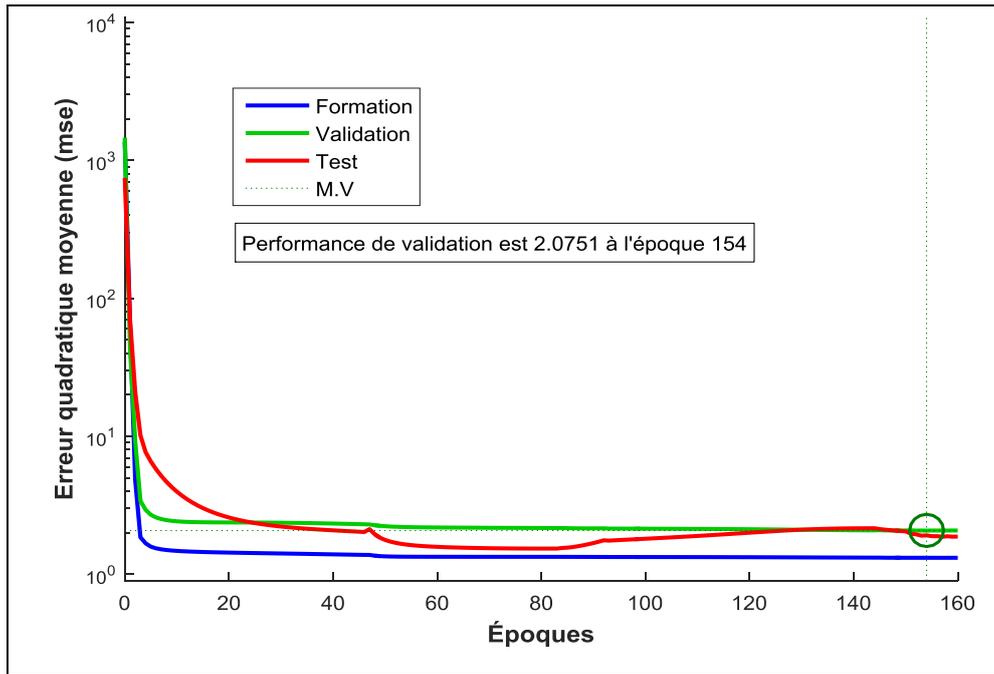
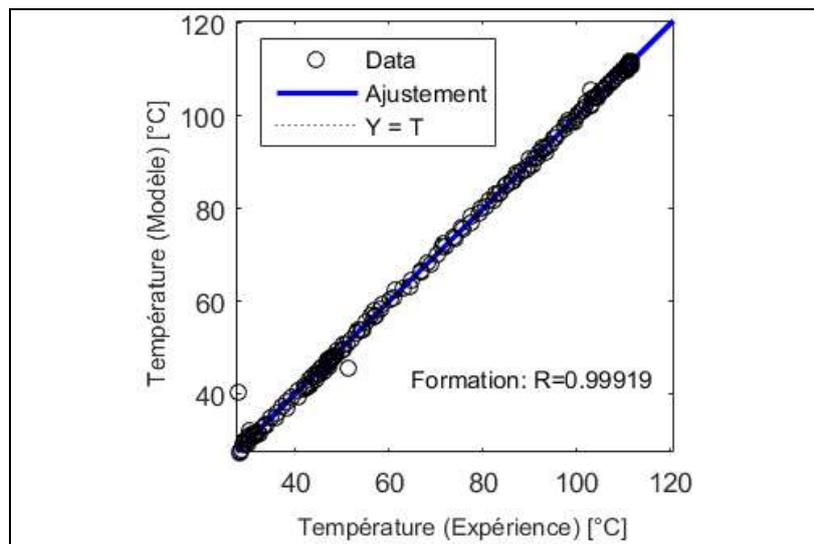


Figure V.11 Erreur quadratique moyenne pour la partie formation, validation et test

La figure (V.12) présente aussi une comparaison entre les résultats du modèle de la température du générateur à adsorbant et les données expérimentales. Les valeurs prédites par le modèle sont en excellent accord avec l'expérience (Coefficient de corrélation de régression linéaire égal à 0.99). Lorsque le coefficient de corrélation s'approche de 1, la précision de la prédiction s'améliore. Dans notre cas, la plage des coefficients de corrélation est très proche de 1, ce qui indique une excellente concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits.



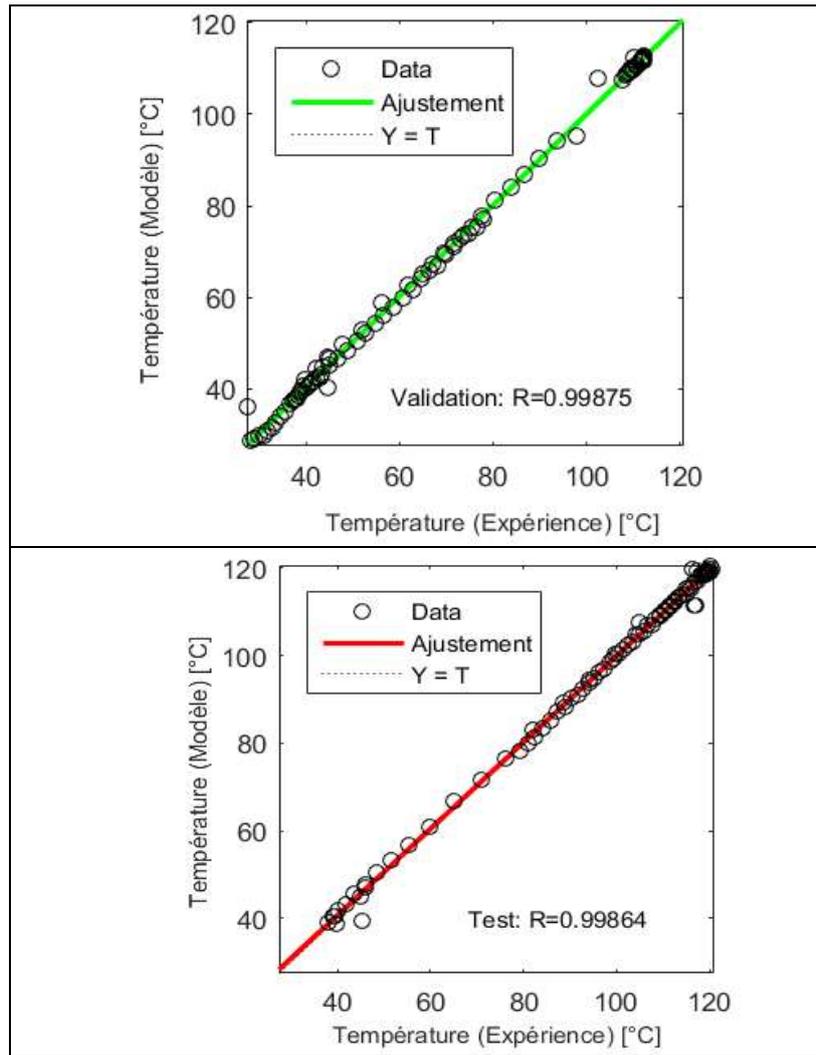


Figure V.12 Coefficient de régression (R)

Les figures (V.13 a, b) montrent les performances prédictives du modèle NARX en évaluant les paramètres de l'autocorrélation d'erreur (a) et la corrélation entre l'entrée et l'erreur (b).

Pour un modèle de prédiction parfait, toutes les corrélations devraient tomber dans les limites de confiance autour de zéro. Cette observation suggère que le modèle neuronal formé avec l'algorithme de formation est efficace pour la prédiction de la température du collecteur à adsorbant avec le rayonnement solaire et la température ambiante.

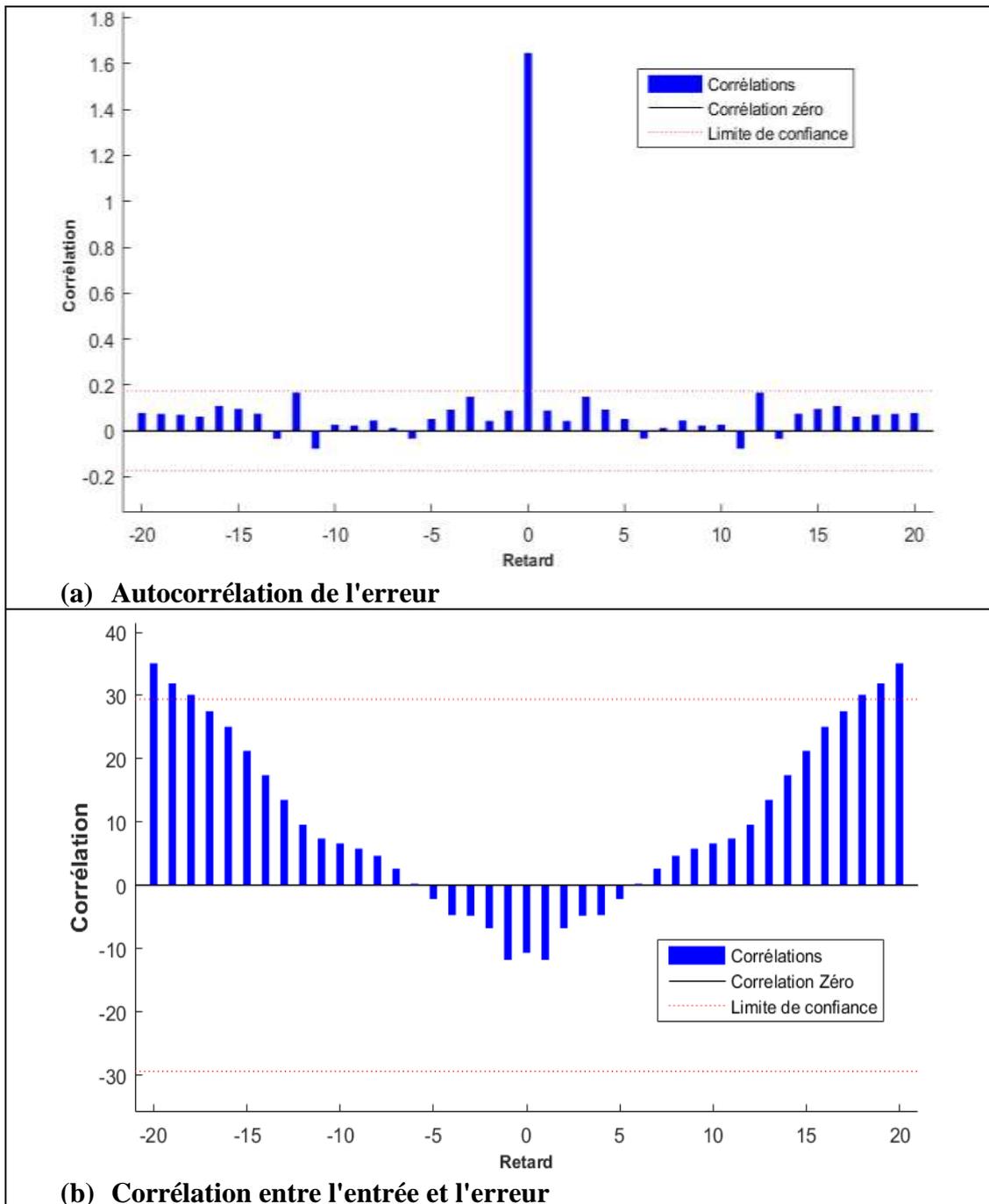


Figure V.13. Autocorrélation de l'erreur

La figure (V.14) montre la performance du modèle NARX en évaluant les paramètres de la réponse en série temporelle. Cette figure, affiche les entrées, les cibles et les erreurs en fonction du temps, et peut également indiquer les points de temps qui ont été sélectionnés pour la formation, le test et la validation.

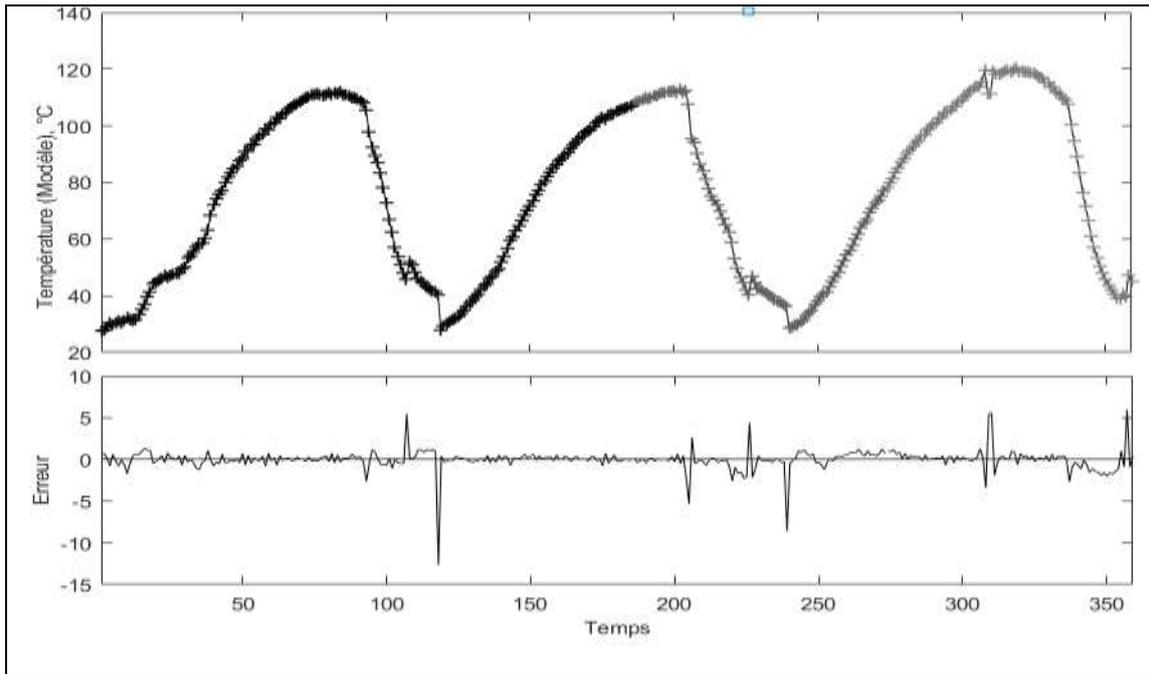


Figure V.14. Résultats prédits par le modèle NARX

La figure (V.15) montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits de la température du collecteur à adsorbant. Ces résultats suggèrent qu'un modèle de calcul fiable pourrait être utilisé pour prédire le comportement thermique du générateur solaire et en particulier la température du collecteur à adsorbant sous différents paramètres comme la température ambiante et l'intensité du rayonnement solaire.

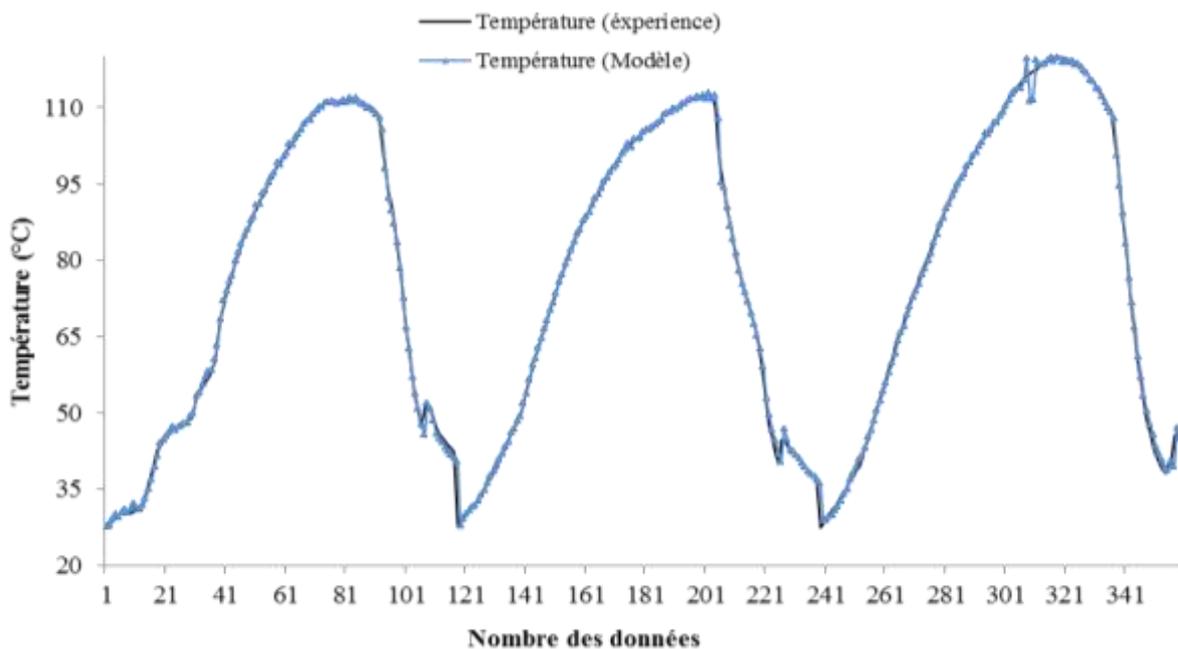


Figure V.15. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

---

Le travail présenté dans ce document traite de la production du froid solaire par adsorption en utilisant le couple silicagel / eau. L'intérêt majeur d'une machine frigorifique à adsorption étant la possibilité offerte par l'utilisation d'énergie calorifique à bas niveau thermique comme source de chaleur.

Les systèmes de réfrigération solaire à adsorption sont des systèmes économiques car ils permettent la production de froid à partir de sources thermiques bon marché réduisant ainsi les coûts d'exploitation et à la fois des systèmes souples car ils peuvent être utilisés dans des zones très reculées ou qui ne sont pas desservies en énergie électrique. Ils peuvent servir dans différentes applications telles que : la conservation des aliments, le stockage des médicaments, la production de glace et les systèmes de climatisation.

A noter aussi que la réfrigération à adsorption solaire est une technologie respectueuse de l'environnement car le système n'utilise aucun réfrigérant de type CFC et HCFC qui sont dommageables pour la couche d'ozone.

Dans ce travail, l'objectif visé est la production de froid à partir de chaleurs à bas niveaux thermiques telles que celles provenant du soleil. Dans cet optique, un générateur à adsorption a été mis au point à l'UDES pour réaliser expérimentalement un cycle thermodynamique basé sur le couple silicagel / eau. Le générateur a été testé dans les conditions météorologiques de Bou-Ismaïl, Algérie. Les résultats sont relevés sous forme de courbes de température et de pression du fluide frigorigène adsorbé sur le silicagel en fonction du temps.

La valeur du COP solaire expérimentale de notre machine à adsorption a été évaluée entre 0,08 et 0,09. Ce résultat est en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature.

L'amélioration des transferts de chaleur au sein du capteur par l'intégration d'une surface réfléchissante pourrait accroître de façon significative la température dans le lit d'adsorbant.

Les résultats expérimentaux obtenus avec notre prototype montre que la température dans l'évaporateur commence à diminuer à partir d'une température moyenne de 30 °C à une valeur moyenne de +6 °C.

## Conclusion générale

---

Cette étude nous a permis d'une part de confirmer sur le plan expérimental l'intérêt du couple silicagel / eau qui peut connaître un développement plus important dans l'avenir. D'autre part de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans un système de réfrigération à adsorption solaire utilisant le couple silicagel / eau. Elle constitue une bonne contribution aux développements des machines frigorifiques solaires à adsorption.

Une application de l'approche de réseaux de neurones artificiels, basée sur la température ambiante et l'irradiance solaire, a été développée pour la prédiction de la température du générateur solaire à adsorbant en utilisant le modèle NARX. Les résultats obtenus avec la configuration (2-2-1) sont appropriés. La performance de la prévision du modèle neuronal a été mesurée à l'aide de l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de régression.

De nombreux progrès restent encore à faire, particulièrement sur la conception des capteurs. Une fois réalisés, ces progrès devraient donner de nouvelles chances aux procédés de froid solaire.

---

# **Références bibliographiques**

---

## Références bibliographiques

---

---

- [1] A. boubakri, m. arsalane, b. vous., ali-moussa, m. pons, experimental study of adsorptive solar powered ice makers in agadir (morocco)-1 performance in actual site. *Renewable Energy*. 2, No. 1, pp. 7-13, 1992.
- [2] Foued Mhiri, Salem El Colli ., Etude d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol. *Rev Gen Therm*, 35: 269-277.1996.
- [3] E.E. Anyanwu, C.I. Ezekwe Design, construction and test run of a solid adsorption solar refrigerator using activated carbon/methanol as adsorbent/adsorbate pair. *Energy Conversion and Management*, 44: 2879–2892. 2003
- [4] Manuel I. Gonzalez, Luis R. Rodriguez. Solar powered adsorption refrigerator with CPC collection system: Collector design and experimental test. *Energy Conversion and Management* 48: 2587–2594. 2007.
- [5] Catherine Hildbrand., Philippe Dind., Michel Pons., Florian Buchter. A new solar powered adsorption refrigerator with high performance. *Solar energy*.77, 311-318. 2004.
- [6] F. Lemmini., A. Errougani. Experimentation of a solar adsorption refrigerator in Morocco. *Renewable Energy*, 2629–2641. 2007
- [7] Antonio Pralon Ferreira Leite., Marcelo Bezerra Grilo., Rodrigo Ronelli Duarte Andrade., Francisco Antonio Belo., Francis Meunier. Experimental thermodynamic cycles and performance analysis of a solar-powered adsorptive icemaker in hot humid climate. *Renewable Energy*. 32, 697–712. 2007.
- [8] Nidal H. Abu Hamdeh., Mutaz A. Al-Muhtaseb. Optimization of solar adsorption refrigeration system using experimental and statistical techniques. *Energy Conversion and Management*. 51, 1610-1615. 2010.
- [9] Li M, Sun CJ, Wang RZ, Cai WD. Development of no valve solar ice maker. *Appl Therm Eng*; 24(5-6):865–72. 2004.
- [10] F. Buchter., Ph. Dind., M. Pons. An experimental solar-powered adsorptive refrigerator tested in Burkina-Faso. *Int. J. Refri*. 26, 79-86. 2003.
- [11] Berdja. M., Abbad. B., Yahi. F., Bouzeffour. F., Ouali. M. Design and realization of a solar adsorption refrigeration machine powered by solar energy. *Energy Procedia*. 48, 1226–1235. 2014.
- [12] Xu. Ji., Ming. Li., Jieqing. Fan., Peng. Zhang., Bin. Luo., Liuling. Wang. Structure optimization and performance experiments of a solar-powered finned-tube adsorption refrigeration system. *Appl. Energy*. 113, 1293–1300. 2014.

- [13] Q.W. Pan., R.Z.Wang., Z.S. Lu., L.W. Wang. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia. *Appl. Therm. Eng.* 72, 275-282. 2014.
- [14] A. Boubakri. A new conception of an adsorptive solar powered ice maker. *Renewable Energy* 28 831–842. 2003.
- [15] Z.S. Lu., R.Z. Wang. Experimental performance investigation of small solar air-conditioning systems with different kinds of collectors and chillers. *Solar Energy*. 110, 7–14. 2014.
- [16] Zisheng Lu., Ruzhu Wang., Zaizhong Xia. Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel–water. *Appl. Therm. Engin.* 50, 1015–1020. 2013.
- [17] Pons M, Guilleminot JJ. Design of an experimental solar powered solid- adsorption ice maker. *J Sol Energy Eng.* 108 (4):332–337. 1986.
- [18] Exell RHB. Solar cooling activities in the Asian Institute of Technology. In: Sayigh AAM, editor. *Renewable energy technology and the environment*. Oxford: Pergamon Press; 700–707. 1992.
- [19] Headley ostc, Kothdiwala AF, Mc Doom IA. Charcoal-methanol adsorption refrigerato rpowered by a compound parabolic concentrating solar collector. *Sol Energy*. 53(2):191–197. 1994.
- [20] Sumathy K, Li Z. Experiments with solar-powered adsorption ice-maker. *Renew Energy*. 16 (1-4):704–707. 1999.
- [21] Li M, Wang RZ, Luo HL, Wang LL, Huang HB. Experiments of a solar flat plate hybrid system with heating and cooling. *Appl Therm Eng.* 22 (13):1445–1454. 2002.
- [22] Li M, Wang RZ, Xu YX, Wu JY, Dieng AO. Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker. *Renew Energy* 27(2):211–221. 2002.
- [23] Khattab NM. A novel solar-powered adsorption refrigeration module. *Appl Therm Eng.* 24 (17-18):2747–2760. 2004.
- [24] Luo HL, Dai YJ, Wang RZ, Tang R, LiM. Year round test of a solar adsorption ice maker in Kunming. *Energy Convers Manag.* 46(13–14):2032–2041. 2005.
- [25] Ahmed MH, El-Seesy IE, Khattab NM. Experimental performance evaluation of a modified solar ice-maker powered by solar energy. In: *Proceedings of the 30th ISES Biennial Solar World Congress; Kassel, Germany; 2011.*

## Références bibliographiques

---

- [26] Santori G, Santamaria S, Sapienza A, Brandani S, Freni A. A stand-alone solar adsorption refrigerator for humanitarian aid. *Sol Energy*.100:172–178. 2014.
- [27] Tan YK, Feng Y, Cui N. Study of solar powered adsorption ice maker. *ACTA Energiae Solaris Sinica*13(3):255–258. 1992.
- [28] Pons M, Grenier Ph. Experimental data on a solar-powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair. *J Sol Energy Eng* 1987;109 (4):303–310.
- [29] Medini N, Marmottant B, El Golli S, Grenier Ph. Etude d'une machine solaire autonome à fabriquer de la glace. *Int J Refrig*.14(6):363–367. 1991.
- [30] Leite APF, Daguene M. Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration. *Energy Convers Manag*. 41(15):1625–1647. 2000.
- [31] Zhang XJ, Wang RZ. Design and performance simulation of a new solar continuous solid adsorption refrigeration and heating hybrid system. *Renew Energy*. 27(3):401–415. 2002.
- [32] Boubakri A. Performance of a nadsorptive solar ice maker operating with a single double function heat exchanger (evaporator/condenser).*Renew Energy*. 31(11):1799–1812. 2006
- [33] Suleiman R, Folayan C, Anafi F, Kulla D. Transient simulation of a flat plate solar collector powered adsorption refrigeration system. *Int J Renew Energy Res*, 657–664. 2012.
- [34] Hassan HZ. A Solar powered adsorption freezer: a case study for Egypt's climate. *Int J Energy Eng*, 21–29. 2013
- [35] Qasem NAA. El-Shaarawi MAI. Improving ice productivity and performance for an activated carbon/methanol solar adsorption ice-maker. *Sol Energy*. 98:523–542. 2013.
- [36] Dai YJ, Sumathy K, Wang RZ, Li YG. Enhancement of natural ventilation in a solar house with a solar chimney and a solid adsorption cooling cavity. *Sol Energy* 74(1):65–75. 2003.
- [37] Critoph RE. An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling. *Renew Energy*. 5 (1-4): 502–508. 1994.
- [38] Critoph RE, Tamainot-TeltoZ, Munyebvu E. Solar sorption refrigerator. *Renew Energy*. 12(4): 409–417. 1997;
- [39] Niemann M, Kreuzburg J, Schreitmüller KR, Leppers L. Solar process heat generation using an ETC collector field with external parabolic circle concentrator (PCC) to operate an adsorption refrigeration system. *Sol Energy*. 59 (1–3):67–73. 1997.

## Références bibliographiques

---

- [40] Aghbalou F, Mimet A, Badia F, Illa J, El Bouardi A, Bougard J. Heat and mass transfer during adsorption of ammonia in a cylindrical adsorbent bed: thermal performance study of a combined parabolic solar collector, water heat pipe and adsorber generator assembly. *Appl Therm Eng.* 24(17- 18):2537–5255. 2004.
- [41] Al Mers A, Azzabakh A, Mimet A, El Kalkha H. Optimal design study of cylindrical finned reactor for solar adsorption cooling machine working with activated carbon–ammonia pair. *Appl Therm Eng.* 26 (16):1866–1875. 2006.
- [42] El Fadar A, Mimet A, Pérez-García M. Study of an adsorption refrigeration system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe. *Renew Energy.* 34 (10): 2271–2279. 2009.
- [43] Louajari M, Mimet A, Ouammi A. Study of the effect of finned tube adsorber on the performance of solar driven adsorption cooling machine using activated carbon–ammonia pair. *Appl Energy.* 88 (3): 690–698. 2011.
- [44] Grenier Ph, Guillemot JJ, Meunier F, Pons M. Solar powered solid adsorption cold store. *J Sol Energy Eng.* 110 (3):192–197. 1988.
- [45] Zhang XJ, Wang RZ. A new combined adsorption–ejector refrigeration and heating hybrid system powered by solar energy. *App Therm Eng.* 22 (11):1245–1258. 2002.
- [46] Omisanya NO, Folayan CO, Aku SY, Adefila SS. Performance of a zeolite – water adsorption refrigerator. *Adv Appl Sci Res.* 3(6):3737–3745. 2012.
- [47] Kreussler S, Bolz D. Experiments on Solar Adsorption Refrigeration Using Zeolite and Water. Laboratory for Solar Energy, University of Applied Sciences Lubeck, 2000.
- [48] Sakoda A, Suzuki M. Simultaneous transport of heat and adsorbate in closed type adsorption cooling system utilizing solar heat. *J Sol Energy Eng.* 108 (3):239–245. 1986.
- [49] Klüppel RP, Gurgel JM. Solar adsorption cooling using silicagel/water. In: Bloss WH, Pisterer F, editors. *Advances in Solar Energy Technology, Vol.3.* Oxford: Pergamon Press; p.2627–2631. 1987.
- [50] Gurgel JM, Espinola Jr. J, Filho LSA, Marcondes F. Sistema de refrigeração adsorção com a utilização de um coletor solar com anteparo ótico. Portuguese: Porto Alegre; (ENCIT). 2000.
- [51] Brites GJVN. Desenvolvimento e otimização de um sistema de refrigeração solar por adsorção. Doctoral thesis. Coimbra, Portugal: University of Coimbra. Portuguese. Available from: <https://eg.sib.uc.pt/handle/10316/21792>. 2013.

- [52] Li M, Huang HB, Wang RZ, Wang LL, Cai WD, Yang WM. Experimental study on adsorbent of activated carbon with refrigerant of methanol and ethanol for solar ice maker. *Renew Energy*. 29 (15): 2235–2244. 2004.
- [53] Bansal NK, Blumenberg J, Kavasch HJ, Roettinger T. Performance testing and evaluation of solid absorption solar cooling unit. *Sol Energy*. 61(2): 127–140. 1997;
- [54] Erhard A, Spindler K, Hahne E. Test and simulation of a solar powered solid sorption cooling machine. *Int J Refrig*. 21 (2): 133–141. 1998.
- [55] Qi Z. Study on hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker. *Int J Archit Sci*, 168–172. 2005.
- [56] Iloeje OC, Ndili AN, Enibe SO. Computer simulation of CaCl<sub>2</sub> solid-adsorption solar refrigerator. *Energy*, 1141–51, 1995.
- [57] Maggio G, Gordeeva LG, Freni A, Aristov YI, Santori G, Polonara F. Simulation of a solid sorption ice-maker based on the novel composite sorbent lithium chloride in silicagel pores. *Appl Therm Eng*. 29 (8–9): 1714–1720. 2009.
- [58] İlhan Ceylan, Okan ErKaymaz, Engin Gedik, Ali Etem Gürel. The prediction of photovoltaic module temperature with artificial neural networks. *Case Studies in Thermal Engineering*, 11–20, 2014.
- [59] Wahiba Yaici, Evgueniy Entchev. Performance prediction of a solar thermal energy system using artificial neural networks. *Applied Thermal Engineering*, 1348-1359. 2014.
- [60] Soteris A. Kalogirou, Sofia Panteliou, Argiris Dentsoras. Modeling of solar domestic water heating systems using artificial neural networks. *Solar Energy*, 335–342. 1999.
- [61] Kemal Ermis, Aytunc Erek, Ibrahim Dincer. Heat transfer analysis of phase change process in a finned-tube thermal energy storage system using artificial neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3163–3175. 2007.
- [62] Abdulrahman Th. Mohammad, Sohif Bin Mat, M.Y. Sulaiman, K. Sopian, Abduljalil A. Al-Abidi. Artificial neural network analysis of liquid desiccant dehumidifier performance in a solar hybrid air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 389-397. 2013.
- [63] Maamar Laidi, Salah Hanini. Optimal solar COP prediction of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs using direct and inverse artificial neural network. *Int. J. Refrig* 36 247-257. 2013.
- [64] Patrick Frey, Stephan Fischer, Harald Druck. Artificial Neural Network modelling of sorption chillers. *Solar Energy*. 108 525–537. 2014.

- [65] Arzu Sencan, Kemal A. Yakut, Soteris A. Kalogirou. Thermodynamic analysis of absorption systems using artificial neural network. *Renewable Energy* 31 29–43. 2006.
- [66] J.A. Hernandez, W. Rivera, D. Colorado, G. Moreno-Quintanar. Optimal COP prediction of a solar intermittent refrigeration system for ice production by means of direct and inverse artificial neural networks. *Solar Energy*. 86; 1108–1117. 2012.
- [67] A. Palau, E. Velo, L. Puigjaner Use of neural networks and expert systems to control a gas/solid sorption chilling machine. *International Journal of Refrigeration*. 22; 59-66. 1999.
- [68] Baiju.V, Muraleedharan.C. Application of neural network for the performance prediction of single stage solar adsorption refrigeration system. *International Journal of Engineering Research & Technology* 1-19. 2013.
- [69] Stephan Fischer, Patrick Frey, Harald Druck. A comparison between state-of-the-art and neural network modelling of solar collectors. *Solar Energy*, 3268-3277. 2012.
- [70] Erkan Dikmen, Mahir Ayaz, H. Huseyin Ezen, Ecir U. Kucuksille, Arzu Sencan Sahin. Estimation and optimization of thermal performance of evacuated tube solar collector system. *Heat Mass Transfer*. 2013.
- [71] I. Farkas, P. Geczy-Vig. Neural network modelling of flat-plate solar collectors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87-102. 2003.
- [72] Adnan Sozen, Tayfun Menlik, Sinan Unvar. Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 1533–1539. 2008.
- [73] Shiva Gorjian, Teymour Tavakkoli Hashjin, Barat Ghobadian, Ahmad Banakar. Thermal performance evaluation of a medium-temperature Point-focus Solar Collector using Local weather data and artificial neural networks. *International Journal of Green Energy*. 2014.
- [74] M. A. Hamdan, A. A. Badran, E. A. Abdelhafez, A. M. Hamdan. Comparison of neural network models in the estimation of the performance of solar collectors. *Journal of infrastructure systems*. 2014.
- [75] M. A. Hamdan, E. A. Abdelhafez, A. M. Hamdan, R. A. Haj Khalil. Heat transfer analysis of a flat-plate solar air collector by using an artificial neural network. *Journal of infrastructure systems*. 2014.
- [76] M. P. Islam, T. Morimoto. Performance prediction of solar collector Adsorber tube temperature using a nonlinear autoregressive model with exogenous input. *International Journal of Computer Applications*, 24-32. 2015.

## Références bibliographiques

---

- [77] Eckhard Worch. “Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling”. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston. 2012.
- [78] Sun Lian-Ming et Meunier Francis., Adsorption. Aspects théoriques. Technique de l'ingénieur (2003).
- [79] E.E. Anyanwu, Review of solid adsorption solar refrigeration II: An overview of the principles and theory, Energy Conversion and Management, 1279–1295, 2004.
- [80] H-M. Henning, Solar assisted air conditioning of buildings – an overview, Applied Thermal Engineering 1734–1749.E., 2007.
- [81] Ruzhu Wang, Liwei Wang and Jingyi Wu. “Adsorption refrigeration technology: theory and application”. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2014
- [82] Hellmut G. Karge., Jens Weitkamp. “Adsorption and Diffusion”. 2008 Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [83] Jürgen U. Keller, Reiner Staudt. “GAS ADSORPTION EQUILIBRIA: Experimental Methods and Adsorptive Isotherms”. Springer Science + Business Media, Inc Boston. 2005.
- [84] Y. Teng, R. Z. Wang and J. Y. Wu, “Study of the fundamentals of adsorption systems”, Applied Thermal Engineering Vol. 17( 4), pp. 327-338,1997.
- [85] Julien REUNGOAT. Etude d'un procédé hybride couplant adsorption sur zéolithes et oxydation par l'ozone. Application au traitement d'effluents aqueux industriels. Thèse de doctorat de l'université Toulouse, France, 2007.
- [86] W. J. Thomas, Barry Crittenden. “Adsorption Technology And Design”. Elsevier Science, 1998.
- [87] R.Z. Wang, R.G. Oliveira. Adsorption refrigeration- An efficient way to make good use of waste heat and solar energy. Progress in Energy and Combustion Science 32 424–458. 2006.
- [88] Medini N, Marmottant B, El Golli S, Grenier Ph. Etude d'une machine solaire autonome à fabriquer de la glace. Int J Refrig, 363–367, 1991.
- [89] R. E. Critoph, Z. Tamainot-telto, E. munyebvu. Solar sorption refrigerator. Renewable Energy. 409-417. 1997.
- [90] A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Agrouaz, T. Bouhal, R. Saidur, A. Benbassou. Performance evaluation of solar adsorption cooling systems for vaccine preservation in Sub-Saharan Africa. Applied Energy. 232–241. 2016.
- [91] Holman, J. P. Heat transfer., 10<sup>th</sup> edition. New York: McGraw- Hill, 2010.

## Références bibliographiques

---

---

- [92] Oleg G. Martynenko Pavel P. Khramtsov. Free-Convective Heat Transfer. Springer-verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [93] Wassila Chekirou. Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption. Constantine : Thèse de l'Université de Mentouri, 2008.
- [94] Jung-Yang San, Wei-Min Lin,. Comparison among three adsorption pairs for using as the working substances in a multi-bed adsorption heat pump. Applied Thermal Engineering, 2008.
- [95] Ahmed N. Shmroukh, Ahmed Hamza H. Ali, Ali K. Abel-Rahman. Adsorption Refrigeration Working Pairs: the state- of-the-Art in the Application. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol: 7, No: 11. 2013.
- [96] Stuart w. Churchill, Humbert H. S. Chu. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. Int. J. Heat Mass Transfer, 1975.
- [97] F. Lemmini, A. Errougani. Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator. Renewable Energy. 30, 1989–2003. 2005.
- [98] Zhao Huizhong., Zhang Min., Liu Zhenyan., Liu Yanling., Ma Xiao dong.. Mechanical and experimental study on freeze proof solar powered adsorption cooling tube using active carbon/methanol working pair. Energy. Convers. Manage. 49, 2434–2438. 2008.
- [99] Enaut Muxika Olasagasti., Application des réseaux de neurones a l'identification d'un axe de machine-outil. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, France, 2002.
- [100] Soteris A. Kalogirou, 2001. Soteris A. Kalogirou. Applications of artificial neural-networks for energy systems. Applied Energy. 67; 17-35. 2000.
- [101] Simon Haykin. Neural Networks and Learning Machines. Third Edition. Pearson Education, Inc. United States of America. 2009.
- [102] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan. Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems- A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1340– 1358, 2012.
- [103] Dilek Kumlutas, , Ziya Haktan Karadeniz, Hasan Avci, Mete Ozsen. Investigation of design parameters of a domestic refrigerator by artificial neural networks and numerical simulations. Inter J Refri. 35; 1678-1689. 2012.

- [104] Hüseyin Kurt, Muhammet Kayfeci. Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol-water solutions by using artificial neural networks. *Applied Energy* 86; 2244–2248. 2009.
- [105] Refet Karadag, Ömer Akgöbek. The prediction of convective heat transfer in floor-heating systems by artificial neural networks. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35; 312–325. 2008.
- [106] J.A. Hernandez, A. Bassam, J. Siqueiros, D. Juarez-Romero. Optimum operating conditions for a water purification process integrated to a heat transformer with energy recycling using neural network inverse. *Renewable Energy* 34; 1084–1091. 2009.
- [107] Rabih OMRAN. Modélisation du moteur diesel, en vue de sa commande dynamique par réseaux de neurones pour minimiser les émissions. Thèse doctorat, Ecole central de Lyon, France, 2007.
- [108] A. Moghaddamia, R. Remesan, M. Hassanpour Kashani, M. Mohammadi, D. Han, J. Piri. Comparison of LLR, MLP, Elman, NNARX and ANFIS Models—with a case study in solar radiation estimation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 975–982, 2009.
- [109] Hava T. Siegelmann, Bill G. Horne, and C. Lee Giles. Computational capabilities of recurrent NARX neural networks. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part b*: 1997.
- [110] G. Mustafaraj, J. Chen, G. Lowry. Thermal behaviour prediction utilizing artificial neural networks for an open office. *Applied Mathematical Modelling*, 3216–3230. 2010.
- [111] Ya-Wei Lee, Tien-Li Chang. Application of NARX neural networks in thermal dynamics identification of a pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 1069–1078. 2009.
- [112] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Howard B. Demuth, Orlando De Jesus. *Neural network design*, 2nd Edition. 2014.
- [113] Sofiane Haddad, Adel Mellit, Mohamed Benghanem, Khalid Osman Daffallah. NARX-Based Short-Term Forecasting of Water Flow Rate of a Photovoltaic Pumping System: A Case Study. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1-6. 2016.
- [114] Martin T. Hagan and Mohammad B. Menhaj. Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 1994.
- [115] Jaques Bernard., "énergie solaire. Calculs et optimisation", Paris, (2004).

---

# **Annexes**

---

**Tableau. 1** – Propriétés de l'air à différentes températures [91].

<b>T</b> °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ 10 <sup>-3</sup> W/(m K)	$c_p$ J/(kg K)	$\eta$ 10 <sup>-6</sup> kg/(m s)	$\nu$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	$Pr$ -	$a$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s
-80	1.807	17.74	1009	12.94	7.16	0.7357	9.73
-60	1.636	19.41	1007	14.07	8.60	0.7301	11.78
-40	1.495	21.04	1007	15.16	10.14	0.7258	13.97
-30	1.433	21.84	1007	15.70	10.95	0.7236	15.13
-20	1.377	22.63	1007	16.22	11.78	0.7215	16.33
-10	1.324	23.41	1006	16.74	12.64	0.7196	17.57
0	1.275	24.18	1006	17.24	13.52	0.7179	18.83
10	1.230	24.94	1007	17.74	14.42	0.7163	20.14
20	1.188	25.69	1007	18.24	15.35	0.7148	21.47
30	1.149	26.43	1007	18.72	16.30	0.7134	22.84
40	1.112	27.16	1007	19.20	17.26	0.7122	24.24
60	1.045	28.60	1009	20.14	19.27	0.7100	27.13
80	0.9859	30.01	1010	21.05	21.35	0.7083	30.14
100	0.9329	31.39	1012	21.94	23.51	0.7070	33.26
120	0.8854	32.75	1014	22.80	25.75	0.7060	36.48
140	0.8425	34.08	1016	23.65	28.07	0.7054	39.80
160	0.8036	35.39	1019	24.48	30.46	0.7050	43.21
180	0.7681	36.68	1022	25.29	32.93	0.7049	46.71
200	0.7356	37.95	1026	26.09	35.47	0.7051	50.30
250	0.6653	41.06	1035	28.02	42.11	0.7063	59.62
300	0.6072	44.09	1046	29.86	49.18	0.7083	69.43
350	0.5585	47.05	1057	31.64	56.65	0.7109	79.68
400	0.5170	49.96	1069	33.35	64.51	0.7137	90.38
450	0.4813	52.82	1081	35.01	72.74	0.7166	101.50
500	0.4502	55.64	1093	36.62	81.35	0.7194	113.10
550	0.4228	58.41	1105	38.19	90.31	0.7221	125.10
600	0.3986	61.14	1116	39.17	99.63	0.7247	137.50
650	0.3770	63.83	1126	41.20	109.30	0.7271	150.30
700	0.3576	66.46	1137	42.66	119.30	0.7295	163.50
750	0.3402	69.03	1146	44.08	129.60	0.7318	177.10
800	0.3243	71.54	1155	45.48	140.20	0.7342	191.00
850	0.3099	73.98	1163	46.85	151.20	0.7368	205.20
900	0.2967	76.33	1171	48.19	162.40	0.7395	219.70
1000	0.2734	80.77	1185	50.82	185.90	0.7458	249.20

**Tableau. 2** – Différentes propriétés des surfaces transparentes [115]

<b>Matériau</b>	épaisseur mm	$\tau^*$ %	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ kJ/kg.K	$\lambda$ W/m.K	$k_d$ 10 <sup>-5</sup> /K
<b>Verre à vitre</b>	3	85-92	2700	840	0,93	0,9
<b>Polycarbonate</b>	3,2	82-89	1200	1260	0,2	6,6
<b>Poly méthacrylate</b>	3,2	89-92	1200	1460	0,2	7
<b>Polyester armé</b>	1	77-90	1400	1050	0,21	3,5
<b>Poly fluor éthylène propylène</b>	0,05	97	2,15	1170	0,25	10
<b>Poly fluorure vinyle</b>	0,1	93	1,50	1380	0,12	4

**Tableau.3** - Caractéristiques de quelques surfaces sélectives [115]

Surface de différents matériaux	$\alpha^*$	$\varepsilon$	$\alpha^*/\varepsilon$
<b>Cuivre poli</b>	0,25	0,02	12,5
<b>Acier poli</b>	0,63	0,09	7
<b>Aluminium anodisé</b>	0,80	0,14	5,71
<b>Aluminium poli</b>	0,10	0,04	2,5
<b>Peinture noire</b>	0,97	0,88	1,10

**Tableau.4** - Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [115]

Matériau	Conductivité thermique $\lambda$ $w/m.K$	Chaleur massique $c_p$ $j/kg.K$	Masse volumique $\rho$ . $kg/m^3$	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ $10^{-6} m^2/s$
<b>Air</b>	0,025	1,2	1003	208
<b>Laine de verre</b>	0,036	40	840	10,7
<b>Polystyrène expansé</b>	0,040	20	1500	13,3
<b>Magnésie</b>	0,055	200	880	3,1
<b>Papier</b>	0,14	700	1340	1,5
<b>Plâtre</b>	0,35	800	800	5,05
<b>brique</b>	0,697	1700	900	405

**Tableau.5** - Différents matériaux isolants utilisés dans les chambres froides [115].

Matériau isolant	Masse volumique ( $kg/m^3$ )	Conductivité thermique $\lambda(w/m.K)$
<b>Liège</b>	110 à 130	0,44
<b>Fibre de verre</b>	22 à 29	0,35
<b>Polystyrène expansé</b>	20 à 30	0,029
<b>Mousse polyuréthane</b>	30 à 40	0,025
<b>Laine minérale</b>	150	/
<b>Line de roche</b>	55 à 100	0,093